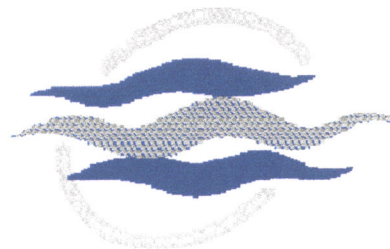




*division hydrologie*



Ecole Nationale du Génie de l'Eau  
et de l'Environnement de Strasbourg

Mémoire de troisième année de l'ENGEES

présenté par

**Jean-Christophe BAUDEZ**

*pour l'obtention du titre de*

**Ingénieur des Techniques de l'Équipement Rural**

**DETERMINANTS HYDROLOGIQUES REGIONAUX**

**POUR LA GESTION ET LA PREVISION**

**DES RESSOURCES EN EAU**

tuteurs : Cécile LOUMAGNE, Claude MICHEL, Michel NORMAND, Bernard PALAGOS

Groupement d'Antony  
Parc de Tourvoie,  
BP 121,  
92185 Antony Cedex  
Tél. 01-40-96-61-21

Septembre 1997



*division hydrologie*

Université Pierre et Marie CURIE,

Ecole des Mines de Paris,

Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

Mémoire de DEA

« Hydrogéologie, Hydrologie, Géostatistique et Géochimie »

---

**DETERMINANTS HYDROLOGIQUES REGIONAUX**

**POUR LA GESTION ET LA PREVISION DES**

**RESSOURCES EN EAU**

---

*Tuteurs :*

Cécile LOUMAGNE

Claude MICHEL

Michel NORMAND

Bernard PALAGOS

---

Groupement d'Antony

Parc de Tourvoie,

BP 121,

92185 Antony Cedex.

Tél. 01-40-96-61-21.

Septembre 1997



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier les deux chefs de division successifs : Messieurs Thierry LEVIANDIER et Gérard SACHON. Le premier pour m'avoir proposé ce stage et le second pour m'avoir accueilli dans sa division.

Toute ma gratitude va à mes tuteurs, Cécile LOUMAGNE, Claude MICHEL, Michel NORMAND et Bernard PALAGOS pour leur encadrement efficace, leur disponibilité et leur gentillesse. Pour tout cela, merci.

Je ne dois pas oublier Christine GUERIN, du Centre d'étude des Environnements Terrestres et Planétaires de Vélizy, et François BARTOLI, du Centre de Pédologie de Nancy, sans qui je n'aurais pas obtenu des informations d'aussi bonne qualité que celles contenues dans ce document.

Merci aussi à tous les membres de la division que j'ai souvent sollicité et qui ne m'ont jamais laissé en panne ainsi qu'aux autres stagiaires : Ahmed, Corinne, Frédéric, Jean-Louis, Leila, Mammoutou, Michel (le quadragénaire), Michel (le quinquagénaire), Redha, Sylvie et Vasken.

D'autre part, ce mémoire est l'aboutissement de plusieurs années d'études que je définirais comme hétéroclites, aussi, je profite de l'occasion pour saluer Monsieur PERNES pour ses excellents cours, ses encouragements et ses conseils avisés qui vont me permettre de rédiger un autre document et de le citer à nouveau dans trois ans...

Enfin, merci maman pour m'avoir toujours laissé libre de mes choix, pourtant pas toujours cohérents, mais qui m'ont malgré tout permis d'en arriver là, avec en prime quelques expériences que je n'aurais plus l'occasion de tenter.

*à Valérie*

## RESUME

### DETERMINANTS HYDROLOGIQUES REGIONAUX POUR LA GESTION ET LA PREVISION DES RESSOURCES EN EAU

La pertinence de l'approche distribuée par rapport à une approche globale de la transformation pluie-débit à travers un modèle hydrologique est une question qui est souvent résolue de façon intuitive et au cas par cas.

Cette recherche présente une tentative pour apporter une réponse objective à ce problème, afin d'améliorer les procédures de modélisation des débits d'un bassin versant, mais aussi de les généraliser aux différentes situations rencontrées.

Deux approches complémentaires ont été suivies :

-la première a consisté à étudier, sur un échantillon de 15 triplets de bassins versants jaugés, l'intérêt de découper un bassin versant en sous-unités pour sa modélisation. L'étude statistique menée sur les critères de Nash, qui nous ont servi à juger de la qualité des résultats, n'a fait pas apparaître de différence sensible dans un sens ou dans l'autre;

-la seconde approche a porté sur une recherche, pour le même échantillon de bassins, de caractéristiques supposées déterminantes pour l'hydrologie. Les différences observées sur ces caractéristiques entre les sous-bassins ont été quantifiées afin d'obtenir un indice mesurant l'intérêt potentiel d'une modélisation distribuée.

Chacune des deux approches ayant apporté des indications sur l'intérêt d'une différenciation des bassins étudiés, une comparaison des résultats a été réalisée afin de déterminer s'il était possible d'établir un lien entre le degré d'hétérogénéité apprécié, au vu des caractéristiques physiographiques, et le choix d'un type de modélisation.

Cette comparaison ne met en évidence de relation claire et pertinente, sur notre échantillon, entre les caractéristiques étudiées et les résultats des deux types de modélisation, globale et semi-distribuée. Le choix d'un type de modélisation n'est pas directement déductible des observations de terrain que nous avons utilisées. Des recherches plus approfondies doivent être entreprises si l'on veut émettre un jugement plus nuancé.

## ABSTRACT

### HYDROLOGICAL REGIONALIZATION FACTORS FOR WATER RESOURCES ASSESSMENT AND FORECASTING

The question whether a distributed approach is more relevant than a lumped one for rainfall-runoff modeling has not yet been answered clearly. Most of the time, the problem is solved rather intuitively, on a case by case basis.

In the course of this research, we attempted to bring an objective answer to this problem, in order to progress in catchment modeling.

Two complementary approaches were used :

.-in the first approach, we used a sample of 15 gaged catchment triplets. We tried to assess whether it was interesting or not to partition a catchment in two subunits during the modeling process. The statistical study of the goodness-of-fit results, as expressed by the Nash and Sutcliffe criterion, did not show a significant difference between both modeling approaches;

.-in the second approach, we used the same catchment sample and measured, for each subunit, physical characteristics that we assumed relevant for its hydrological behavior. Differences observed in the subunits characteristics were quantified to obtain an index measuring the potential interest of distributed modeling.

Both approaches gave indications concerning the interest of subcatchment . Therefore, we compared results to determine whether or not it is possible to link physical heterogeneity (as measured by our index) and the choice of one or the other type of modeling.

On the basis of our catchment sample, no clear link could be established between catchment physical characteristics and the results of lumped and semi-distributed models. In the present stage, we feel that it is not possible to choose between a lumped and a semi-distributed modeling approach, on the basis of catchment physical characteristics, such as these that we used in this research. Further research is needed to precise the above conclusion.

**SOMMAIRE**

Introduction.....	8
1. La modélisation pluie-débit .....	9
1.1. Généralités.....	9
1.2. Modèle global et modèle semi-distribué.....	9
1.3. Calage du modèle.....	10
1.4. Optimisation des paramètres.....	11
1.5. Critères de qualité d'ajustement .....	12
1.5.1. Approche qualitative.....	12
1.5.2. Approche quantitative.....	12
2. Comparaison de l'approche globale et de l'approche semi-distribuée.....	14
2.1. Mode opératoire.....	14
2.2. Le modèle utilisé : GR4J.....	18
2.2.1. Présentation.....	19
2.2.2. Principe de fonctionnement.....	20
2.2.3. Optimisation des paramètres .....	24
2.2.4. Période de calage et mise en route.....	24
2.3. Les méthodes de comparaison.....	25
3. Les résultats de la modélisation.....	26
3.1. Les bassins versants utilisés.....	26
3.2. Comparaison qualitative.....	28
3.3. Analyse statistique .....	30
3.3.1. Fréquence au non dépassement : $F_i$ .....	30
3.3.2. Statistique de Wilcoxon.....	31
4. Le modèle Semi-distribué.....	36
5. Un exemple concret : le bassin AVEYRON .....	39
5.1. La modélisation.....	39
5.2. Caractéristiques physiques des bassins.....	41
5.2.1. La pédologie.....	41
5.2.2. La géologie.....	43
5.2.3. Les paysages.....	45
5.2.4. Le couvert végétal.....	46
6. Comparaison des sous-bassins à l'intérieur des bassins.....	49
6.1. Les caractéristiques physiques des bassins .....	49
6.1.1. La densité de drainage.....	49
6.1.2. La topographie.....	50
6.2. Le couvert végétal.....	52
6.3. La pédologie et la géologie.....	53
6.4. La méthode de comparaison.....	58
6.4.1. Protocole de comparaison.....	58
6.4.2. Analyse des résultats.....	60
6.4.4. Comparaison avec les résultats de la modélisation.....	62
CONCLUSION.....	64
BIBLIOGRAPHIE .....	66
ANNEXES.....	70
Annexe n°1 : résultats de la modélisation.....	71
Annexe n°2 : Densité de drainage par sous bassin.....	75
Annexe n°3 : Répartition surfacique des altitudes .....	76
Annexe n°4 : Résultats de la base CORINE LAND COVER et extraits de cartes.....	77





## Introduction

Pour identifier les conditions optimales d'aménagement et de gestion de la ressource en eau, et pour aborder la prévision des impacts, tant des phénomènes naturels que des actions anthropiques, il faut pouvoir analyser les processus majeurs à différentes échelles spatio-temporelles et savoir les modéliser.

Or, les facteurs déterminants dans les mécanismes hydrologiques sont extrêmement variables tant dans leur répartition spatiale que temporelle, ce qui rend très complexe la représentation mathématique de ces phénomènes.

Jusqu'à présent, seule une modélisation globale des processus avec des paramètres intégrant les hétérogénéités locales avait permis de proposer des outils simples et opérationnels pour la gestion et la prévision de la ressource en eau à l'échelle d'un bassin.

Mais un des objectifs de l'hydrologie est d'obtenir des méthodes transposables d'un site à un autre ou d'une échelle à une autre. Pour ce faire, il est nécessaire de relier les paramètres du modèle à des grandeurs caractéristiques du milieu physique.

Aussi, pour tenir compte de l'hétérogénéité d'un bassin, une démarche assez souvent suivie est la discrétisation du milieu étudié avec une taille de maille telle que les paramètres physiques sont supposés homogènes. En outre, la variabilité entre les mailles doit reproduire une distribution observée ou présumée des grandeurs physiques et de leurs dépendances par rapport à des grandeurs macroscopiques établies sur quelques points de mesures. Cette approche a suscité de nombreuses études qui ont permis de mieux appréhender les processus à l'échelle de la maille choisie mais s'est révélée peu satisfaisante quant aux améliorations apportées aux méthodes de gestion et de prévision opérationnelles.

Dans cette optique, le sujet proposé va tenter d'apporter un début de réponse à la question suivante non encore résolue : « **L'approche distribuée apporte-t-elle une amélioration par rapport à l'approche globale, pour la gestion et la prévision opérationnelle des débits?** » Pour répondre le plus rigoureusement possible à cette question, nous allons dans un premier temps comparer les deux approches à l'aide d'un même modèle, afin de quantifier le gain de précision. Dans un second temps, indépendamment du reste, nous chercherons à classer les bassins étudiés en fonction de leur hétérogénéité. La mise en parallèle des ces deux comparaisons permettra d'observer l'existence d'un lien reliant la variabilité entre les mailles et la discrétisation du milieu modélisé.

## **1. La modélisation pluie-débit**

### **1.1. Généralités**

Le dictionnaire français d'hydrologie de surface (Roche, 1986) définit le modèle comme une « représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou tout au moins son comportement, afin d'en tirer toute conséquence concernant l'estimation de ses paramètres, son évolution, les prévisions de son exploitation, etc.... En ce sens, par exemple, une loi de distribution statistique est un modèle ». Le modèle est nécessairement réductionniste de la complexité naturelle. Il est une image de la réalité, modélisé par oubli de nombreuses propriétés jugées non pertinentes pour les questions posées (Roche, 1988).

Les modèles hydrologiques ont la particularité d'intégrer des facteurs complexes tout en ayant l'ambition de décrire, par une représentation voulue aussi simple que possible, le comportement d'un bassin versant. La modélisation pluie-débit consiste ainsi à déterminer à l'aide d'outils mathématiques les débits à un exutoire, par transformation des données pluviométriques recueillies sur le bassin.

### **1.2. Modèle global et modèle semi-distribué**

Lorsqu'un certain cadre géographique doit être représenté dans un modèle deux options sont possibles.

Quand on peut estimer que les variations spatiales des paramètres et des variables d'entrées peuvent être prises en compte d'une façon globale et qu'il n'y a pas lieu d'effectuer un découpage dans l'espace (le modèle est d'ordre zéro dans l'espace), on dit que le modèle est global.

Au contraire, quand l'étendue ou l'hétérogénéité du cadre physique, comme la concentration et la diversité spatiale des interventions anthropiques sur le système, peuvent conduire à préférer a priori une discrétisation de l'espace des entrées et des paramètres, on construit alors un modèle semi-distribué. La forme des unités élémentaires qui seront représentées par un modèle global peut être arbitraire, ou fondée sur des divisions naturelles, par exemple des mailles carrées, ou un découpage par sous-bassins. Par construction, un modèle semi-distribué est une juxtaposition de modèles globaux appliqués sur des mailles plus ou moins fines. Sur chacune des mailles, les variables spatiales et autres flux sont représentés



par des scalaires. La globalisation au niveau d'une maille semble à priori d'autant plus légitime que la maille est plus petite, car les processus y opérant sont moins divers. Ainsi, l'utilisation de paramètres réels à l'échelle de la maille suppose implicitement que cette maille est homogène. Cependant, on introduit un besoin de modélisation supplémentaire qui est le modèle d'agrégation des flux en sortie des mailles constitutives.

Certains modèles globaux en hydrologie essaient de prendre en compte l'hétérogénéité de l'occupation du sol dans les bassins versants en les découpant en parcelles fictives correspondant chacune à un type d'occupation, ces niveaux de découpage n'ayant pas un ordre hiérarchique les uns par rapport aux autres. Ces modèles sont appelés semi-distribués.

### **1.3. Calage du modèle**

En hydrologie, les principaux modèles opérationnels sont des modèles globaux dont les paramètres ne peuvent pas être estimés directement par la mesure de grandeurs physiques sur le terrain. On ne peut les obtenir que par optimisation d'un critère de qualité des débits générés par le modèle.

De même, pour les modèles semi-distribués, les variables mesurées étant issues de grandeurs expérimentales déterminées en laboratoire par reconstitution à une échelle réduite des phénomènes naturels, l'initialisation du modèle passe par une phase de calage.

Quelle que soit l'approche utilisée, le calage du modèle exige :

- 1- une série chronologique de données représentatives des différentes entrées du système,
- 2- une estimation initiale des paramètres et des variables d'état du système,
- 3- un critère pour évaluer la qualité de la simulation des débits par le modèle,
- 4- une méthode d'ajustement des paramètres.

#### 1.4. Optimisation des paramètres

L'optimisation des différents paramètres d'un modèle consiste à trouver un jeu de ces paramètres rendant minimale la fonction critère. Pour cela, différentes techniques d'optimisation sont disponibles : méthodes de ROSENBROCK, (1960), et FLETCHER-POWELL, (1964), pour ne citer que les plus fréquentes.

Nous nous limiterons à la méthode dite de la recherche systématique pas à pas (MICHEL, 1989) qui, à défaut de donner l'optimum exact, donne une solution approchée suffisamment précise. Cette méthode tire sa robustesse d'une transformation préalable, en général par la fonction logarithme, de l'espace des paramètres afin qu'ils soient tous définis sur la droite des réels, étant donné que ces paramètres à caler sont généralement des nombres strictement positifs ou des exposants définis sur la droite des réels. Le principe de la méthode consiste à rechercher le minimum en suivant le chemin de la plus grande pente.

L'ensemble de définition de  $n$  paramètres est alors  $\mathbb{R}^n$ . On débutera la recherche à partir d'un point initial et l'on se déplacera sur chaque axe d'une même quantité  $\Delta x$ , pouvant évoluer au fur et à mesure de l'avancement. Chaque paramètre est modifié de plus ou moins  $\Delta x$  et l'on enregistre à chaque fois le résultat de la modification sur la valeur du critère. Lorsque les  $n$  paramètres auront été modifiés, on retiendra comme nouveau point-paramètre celui qui correspond à la plus faible valeur du critère. S'il n'y a pas eu d'amélioration par rapport au point initial, on recommence après avoir divisé le pas par deux. S'il y a des améliorations successives depuis  $2n$  itérations, on multiplie  $\Delta x$  par deux.

Le critère d'arrêt ne porte pas sur la fonction mais sur  $\Delta x$  : on arrête la recherche lorsque  $\Delta x < 0.01$ .

Dans le cas d'un seul paramètre, le principe est le suivant :

Soit  $F$  la fonction objectif,  $x^0$  la valeur initiale du paramètre à optimiser,  $x^{(1)}$ ,  $x^{(2)}$ , ...,  $x^{(i)}$ , ...,  $x^{(n)}$  les valeurs obtenues successivement et  $x^*$  la valeur optimale.

Notons  $F^{(i)}$  la valeur de  $F$  au pas 'i'. Au pas 'i+1', on considère les bornes de l'intervalle de largeur  $2\Delta x$ , centré sur  $x^{(i)}$  :

$$x_1^{(i+1)} = x^{(i)} - \Delta x \Rightarrow F_1^{(i+1)}$$

$$x_2^{(i+1)} = x^{(i)} + \Delta x \Rightarrow F_2^{(i+1)}$$

$$F^{(i+1)} = \text{Min}[F_1^{(i+1)}, F_2^{(i+1)}]$$

si  $F^{(i+1)} < F^{(i)}$ , alors  $x^{(i+1)} = x_j^{(i+1)}$ , avec  $j$  correspondant à  $\text{Min}[F_j, j=1,2]$

si  $F^{(i+1)} \geq F^{(i)}$ , le prochain pas de recherche sera divisé par deux.

Le critère le plus répandu et le plus rustique est la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs calculées :

$$F = \sum_{i=1}^m [X_{obs.}(i) - X_{calc.}(i)]^2$$

où  $X_{obs.}$  représente les valeurs observées (ici, des débits),

et  $X_{calc.}$  représente des valeurs calculées.

### 1.5. Critères de qualité d'ajustement

Un modèle permet de produire une série chronologique de débits  $Q_c$  à partir des entrées de pluie ( $P$ ) et d'évapotranspiration potentielle ( $ETP$ ). Le modèle sera d'autant plus satisfaisant que les débits  $Q_c$  seront proches des débits  $Q_0$  effectivement observés.

Apprécier la validité du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques  $Q_0$  et  $Q_c$ . Deux approches peuvent être utilisées pour évaluer la qualité d'un ajustement entre valeurs observées et valeurs simulées par le modèle.

#### 1.5.1. Approche qualitative

Elle consiste à représenter graphiquement les valeurs observées et les valeurs simulées, et, à partir d'une évaluation visuelle, d'émettre un jugement sur la qualité de l'ajustement.

#### 1.5.2. Approche quantitative

Il existe dans la littérature un très grand nombre de critères indépendants du jugement de l'observateur, le plus classique étant celui des moindres carrés. Il est parfois commode de rendre cette quantité adimensionnelle pour faciliter les comparaisons; c'est ce qui est fait avec

le critère de NASH (Nash et Sutcliffe, 1970). Le modèle est d'autant meilleur que le Nash est proche de 100.

$$NASH = 100 \times \left[ 1 - \frac{\sum (Q_0 - Q_c)^2}{\sum (Q_0 - Q_m)^2} \right]$$

avec  $Q_m$  moyenne des débits observés.



## **2. Comparaison de l'approche globale et de l'approche semi-distribuée**

### **2.1. Mode opératoire**

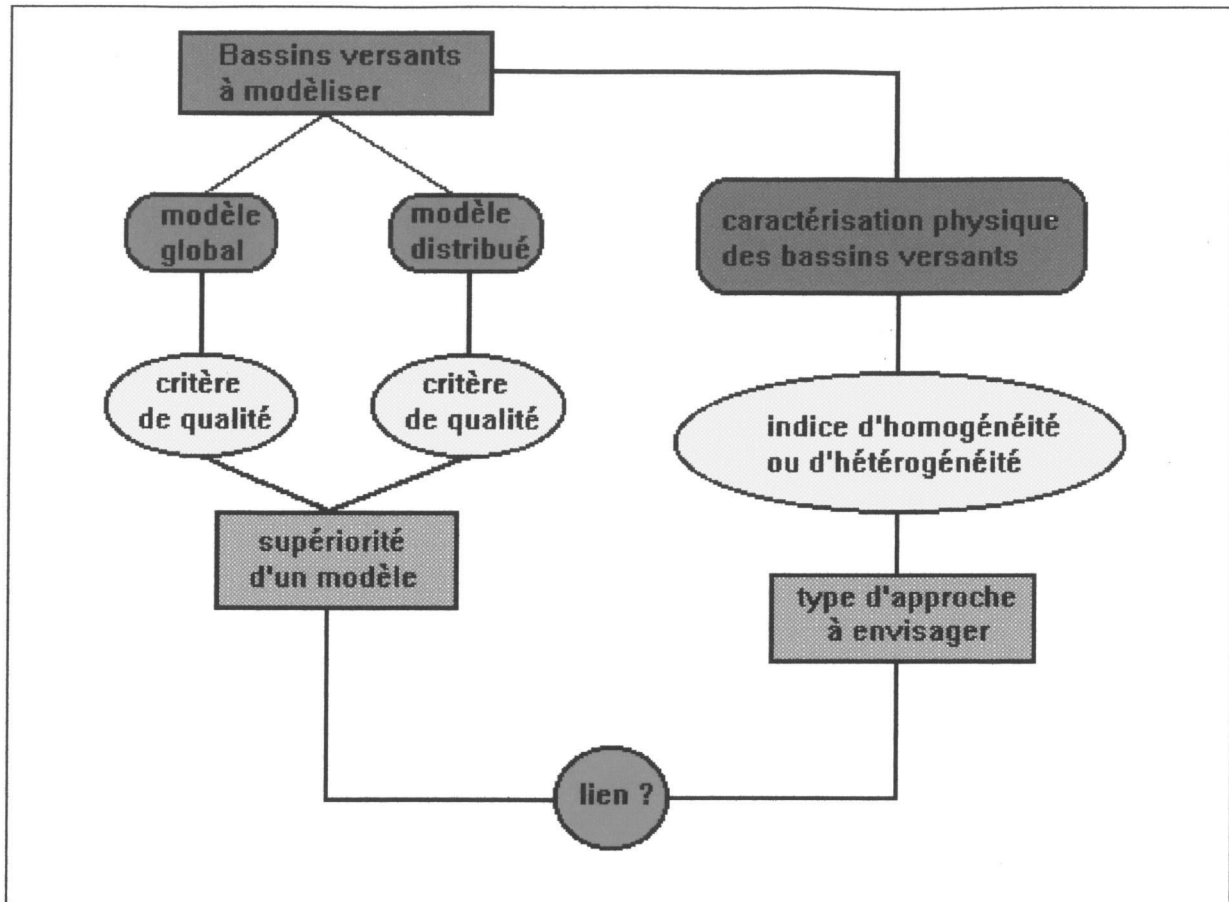
Le but de cette partie est de tenter d'apporter une réponse à la question suivante : obtient-on de meilleurs résultats dans la modélisation pluie-débit quand on opère un découpage du bassin versant ?

Pour y répondre, le processus comparatif que nous avons mis au point va rapprocher une classification des résultats des différents modèles par rapport à la modélisation pluie-débit (globale ou semi-distribuée) proprement dite et une classification des bassins versants utilisés en fonction du degré d'homogénéité des mailles constitutives. Ces deux classifications doivent nécessairement être indépendantes afin de rester rigoureux à chaque étape. En effet, si on établit la classification des données physiques par rapport aux résultats de la modélisation, l'étude ne peut être validée que si l'on peut utiliser un second échantillon de bassins en contrôle.

Donc, si l'on met en évidence un recoupement entre les deux classifications indépendantes, on pourra alors conclure à l'existence d'un lien entre le modèle et la physique. Sinon, il ne sera pas possible de répondre à la question.

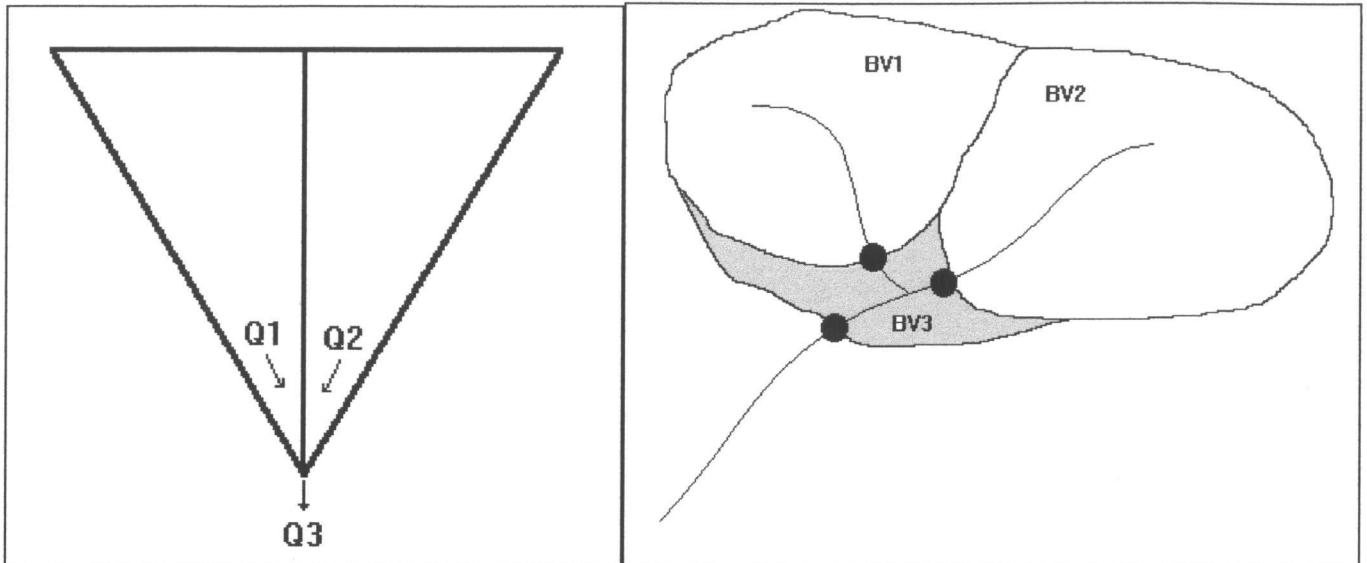
La figure n°1 résume les études à mener : d'un côté, nous allons appliquer un modèle global et un modèle semi-distribué à un échantillon de bassins versants, afin d'observer quelle approche apporte des résultats significativement meilleurs dans la modélisation pluie-débit. De l'autre, il faut rechercher des homogénéités et hétérogénéités à l'intérieur de ces bassins versants, afin d'établir un éventuel lien entre les résultats de la modélisation mathématique et une analyse la plus complète possible des caractéristiques des bassins.

De plus, notre objectif ici n'est pas de comparer un modèle global X avec un modèle semi-distribué Y différent, mais d'apprécier l'intérêt de découper le bassin versant en mailles plus petites pour mieux en modéliser les processus, avec le même modèle. De façon pragmatique, on se propose de tester la simple division par deux de la maille, en partant d'une première recouvrant l'ensemble d'un bassin versant. Notre modèle semi-distribué, élémentaire, sera donc composé de la juxtaposition des deux modèles globaux relatifs à la partition du bassin global en deux sous-bassins comme l'indique les figures 2a et 2b ci-après.



(figure n°1)

Dans un souci de comparaison rigoureuse, la situation idéale est un découpage d'un bassin versant en deux entités égales, dont la somme correspond exactement au bassin initial (fig. 2a), mais trouver trois stations de jaugeage à proximité immédiate d'une confluence, avec une assez longue série de données communes est pratiquement impossible. Aussi, le cas le plus fréquent réunit trois stations de jaugeage peu éloignées d'une confluence, ce qui introduit une donnée supplémentaire : le bassin intermédiaire, grisé sur la figure 2b, et dont il faudra tenir compte dans la modélisation semi-distribuée.



(fig. 2a (cas idéal))

(fig. 2b (cas réel))

Par conséquent, et afin de n'introduire aucun biais relatif à la qualité des modèles, la comparaison entre les deux approches s'articulera autour du même modèle dans deux configurations différentes, la globale et la semi-distribuée, et ceci afin de pouvoir apporter une réponse quant à l'intérêt ou non de découper les bassins versants en fonction de leurs caractéristiques physiques.

Donc, est ce que l'agrégation des flux modélisés pour les deux sous-bassins ( $Q_1^{calc} + Q_2^{calc}$ ) donne de meilleurs résultats vis à vis du débit observé à l'exutoire du bassin total ( $Q_3^{obs}$ ) que le débit calculé sur l'ensemble du bassin ( $Q_3^{calc}$ ) ?

Considérons donc un bassin versant dans sa configuration réelle, telle que présentée figure 2b. En raisonnant sur les volumes et les lames écoulées, suite à une pluie homogène sur le bassin versant total, si  $V_T$  représente le volume total écoulé, et si  $L_T$  est la lame écoulée, alors, on peut écrire :

$$V_T = L_T \times S_T \Leftrightarrow L_T S_T = L_1 S_1 + L_2 S_2 + L_3 S_3$$

Or, avec  $S_3$  surface du bassin intermédiaire, on a :

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3$$

D'où,

$$L_T \cdot (S_1 + S_2 + S_3) = L_1 S_1 + L_2 S_2 + L_3 S_3$$

L'égalité précédente s'écrit aussi :

$$\Leftrightarrow \begin{cases} L_1 S_1 + L_2 S_2 = L_T S_T - L_3 S_3 \\ L_1 S_1 + L_2 S_2 = L_T (S_1 + S_2) + S_3 (L_T - L_3) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} L_1 S_1 + L_2 S_2 \leq L_T S_T \\ L_1 S_1 + L_2 S_2 \geq L_T (S_1 + S_2) \end{cases}$$

Ce qui aboutit à l'inégalité suivante :

$$\boxed{\frac{L_1 S_1 + L_2 S_2}{S_T} \leq L_T \leq \frac{L_1 S_1 + L_2 S_2}{S_1 + S_2}}$$

De plus,  $L_i$  étant proportionnel à  $\frac{Q}{S}$ , on obtient :

$$\boxed{\begin{aligned} L_1 S_1 + L_2 S_2 \leq Q_T \leq \frac{S_T}{S_1 + S_2} (L_1 S_1 + L_2 S_2) \\ \Leftrightarrow Q_1 + Q_2 \leq Q_T \leq \frac{S_T}{S_1 + S_2} (Q_1 + Q_2) \end{aligned}}$$

Donc, si  $S_T$  est très différent de  $S_1 + S_2$ , l'encadrement de  $Q_T$  est large.

D'où la nécessité de tenir compte du bassin intermédiaire lorsqu'il est important, afin de ne pas pénaliser l'approche semi-distribuée par rapport à l'approche globale, en négligeant une partie de l'information.

C'est pourquoi, la modélisation du bassin intermédiaire va se faire selon trois approches différentes :

- cas 1 : le bassin intermédiaire peut effectivement être assimilé au fonctionnement des deux sous-bassins au prorata de leurs surfaces,
- cas 2 : le bassin intermédiaire donne des débits différents d'une combinaison des deux sous-bassins au prorata de leurs surfaces. Dans ce cas, on optimise une constante multiplicative de la somme pondérée des bassins amonts pour que le débit calculé soit proche du débit observé en aval.
- cas 3 : le bassin intermédiaire est davantage influencé par l'un des deux sous-bassins que ne le laisse entrevoir la proportion des superficies. Cela pourrait être le cas notamment lorsqu'une des deux stations à l'amont est assez éloignée de la

confluence. Dans ce cas, on estime le débit du bassin intermédiaire par calage de deux constantes multiplicatives, chacune relative au débit d'un des deux bassins amonts.

$$\begin{aligned}
 \text{cas 1 (distribué 0)} : Q_T &= \frac{S_T}{S_1 + S_2} \cdot (Q_1 + Q_2) \\
 \text{cas 2 (distribué 1)} : Q_T &= e^x \cdot \frac{S_T}{S_1 + S_2} \cdot (Q_1 + Q_2) \\
 \text{cas 3 (distribué 2)} : Q_T &= \frac{S_T}{S_1 + S_2} \cdot (e^{x_1} \cdot Q_1 + e^{x_2} \cdot Q_2)
 \end{aligned}$$

En procédant de la sorte, les critiques souvent énoncées en modélisation perdent de leur ampleur, et ainsi, par référence à la tragédie grecque, les contraintes d'unités de lieu, d'action et de temps sont respectées. En effet, concernant l'unité de lieu, le modèle est utilisé strictement sur le domaine d'espace sur lequel il a été calé, puisque systématiquement calé sur une période donnée relative au bassin versant étudié. Ensuite, il est contrôlé sur deux ou trois périodes différentes de la période de calage, de manière à limiter l'influence des inévitables différences climatiques sur la réponse du modèle, et à respecter l'unité de temps. Quant à l'unité d'action, elle est automatiquement respectée dans la mesure où l'action modélisée est toujours la même.

Pour conclure ce paragraphe sur un clin d'oeil, le respect de l'unité de lieu permet, non seulement d'écarter une critique parfois formulée, mais aussi d'éviter les peines de réclusion à perpétuité requises lors des flagrants délits d'extrapolation ( de Marsily, 1994 ).

## **2.2. Le modèle utilisé : GR4J**

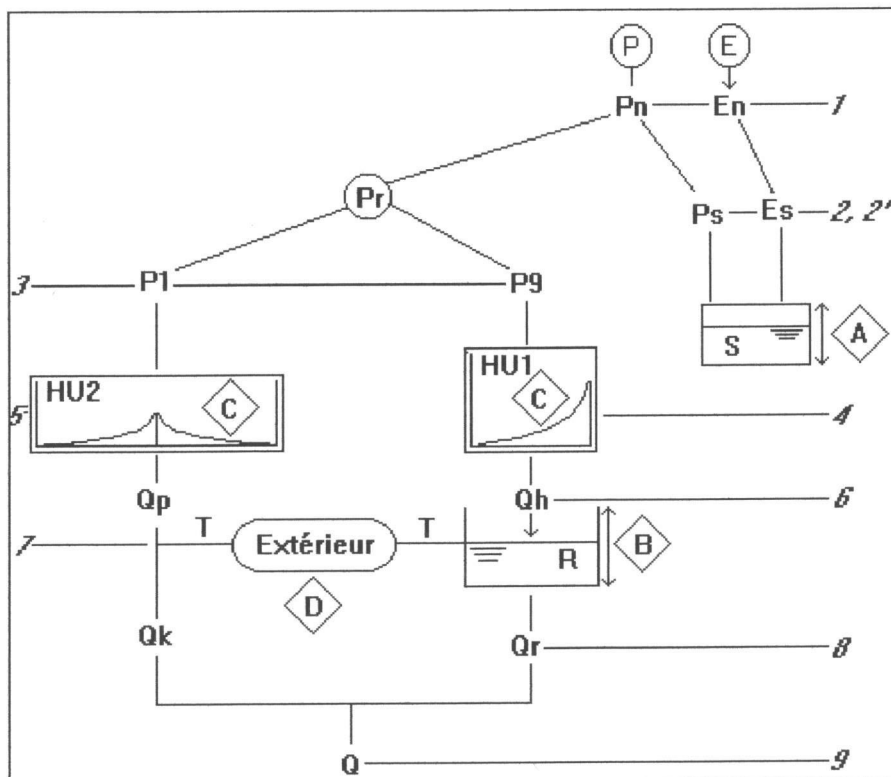
Le modèle utilisé, GR4J, a été choisi pour sa simplicité d'utilisation et sa robustesse ( il a été utilisé sur plus de 300 bassins versants), et c'est l'outil de recherche de la division hydrologie, ce qui nous a permis de l'adapter facilement à l'approche semi-distribuée.

### 2.2.1. Présentation

Les modèles « GR » sont nés d'une idée lancée par Claude Michel en 1983 après l'essai d'un modèle conceptuel, CREC (Galéa, 1972), à 9 paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Michel a constaté des défauts dans ce modèle en estimant qu'« outre la difficulté de mise en œuvre, et la longueur des réglages, on ne maîtrise pas toujours le fonctionnement réel du modèle ».

Le développement s'est opéré en partant du modèle le plus élémentaire possible, (un réservoir, un paramètre), et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à produire des débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. Ainsi est né GR4J, après modifications et complications du modèle de base (Michel, 1983; Edijatno, 1988; Edijatno et Michel, 1989; Edijatno et Michel, 1991; Nascimento, 1994; Makhoul, 1994).

Le modèle GR4J est un modèle empirique global qui permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir des données de pluie et d'évaporation moyenne. Il fonctionne au pas de temps journalier et n'utilise que des valeurs décennales moyennes interannuelles pour l'évapotranspiration potentielle, ce qui le rend facilement utilisable en réduisant les seules données datées aux données de pluie.



(figure n°3)



Les numéros du schéma précédent renvoient aux explications des paragraphes correspondants.

### 2.2.2. Principe de fonctionnement

Supposons que l'on se trouve au début du jour 'i'. Notons  $P$  et  $E$  respectivement la pluie et l'évapotranspiration du jour considéré.

1. calcul de  $P_n$  et  $E_n$  :

si  $P > E$  alors  $P_n = P - E$  et  $E_n = 0$ ,

sinon  $P_n = 0$  et  $E_n = E - P$ .

La fonction de production s'organise autour d'un réservoir-sol, caractérisé par sa capacité  $A$ . Il est alimenté par la pluie  $P_n$  ou soumis à  $E_n$ , l'évapotranspiration. Si à l'entrée du modèle une quantité élémentaire de pluie  $dP_n$  arrive, la pluie nette correspondante sera :

$$\left(\frac{S}{A}\right)^2 \cdot dP_n$$

et la quantité

$$\left[1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right] \cdot dP_n$$

entre dans le réservoir-sol.

Comme l'évaporation  $E_n$  de ce jour est nulle, la pluie  $dP_n$  est seule responsable de la variation de  $S$  :

$$dS = \left[1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right] \cdot dP_n$$

que l'on intègre facilement entre les états initial  $S_1$  et final  $S_2$  du jour 'i'.

2. si  $P_n > 0$ , calcul de la pluie nette  $P_r$  :

$$P_r = S_2 - S_1 = P_n - A \times \frac{\tanh\left(\frac{P_n}{A}\right) \times \left(1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right)}{1 + \frac{S}{A} \times \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right)}$$

où  $A$  est un paramètre positif exprimé en mm. Le niveau du réservoir  $S$  est augmenté de

$$P_s = P_n - P_r$$

et ne changera pas jusqu'au pas de temps 'i+1'.

Si au contraire, il se produit une évaporation élémentaire  $dE_n$ , elle donnera lieu à une évaporation réelle égale à :

$$\frac{S}{A} \times \left[ 2 - \left( \frac{S}{A} \right) \right] \times dE_n$$

égale en valeur absolue à la baisse du niveau du réservoir-sol  $dS$

$$dS = - \left( \frac{S}{A} \right) \times \left[ 2 - \left( \frac{S}{A} \right) \right] \cdot dE_n,$$

qui s'intègre entre les états  $S_1$  et  $S_2$

2'. si  $E_n > 0$ , une évapotranspiration réelle  $E_s$  se produit :

$$E_s = S_2 - S_1 = A \times \frac{\frac{S}{A} \times \left( 2 - \frac{S}{A} \right) \times \tanh(E/A)}{1 + \left( 1 - \frac{S}{A} \right) \times \tanh(E/A)}$$

$E_s$  est extrait du réservoir S dont le niveau restera inchangé jusqu'au pas de temps 'i+1'.

2''. si  $P_n = E_n = 0$ , alors  $P_r = E_s = 0$  et le réservoir S ne varie pas.

3. Le transfert de la pluie nette  $P_r$  est, dans une première étape, assuré par deux hydrogrammes unitaires dépendant d'un seul et même paramètre C exprimé en jours.

La pluie nette est fractionnée en deux parties :

4. une première de 90% sera traitée par le premier hydrogramme unitaire HU1 et sera ensuite introduite dans le réservoir « eau-gravitaire ».

Soit  $q(t)$  la fonction déterminant le premier hydrogramme unitaire HU1. Edijatno (1991) a montré qu'une expression satisfaisante est :

$$q(t) = \frac{3t^2}{C^3} \quad \text{pour} \quad 0 \leq t \leq C$$

$$q(t) = 0 \quad \text{si} \quad t > C$$

Soit  $k$  la partie entière de  $C$ . HU1 se discrétise de la façon suivante :

$q_1, q_2, \dots, q_{k+1}$  sont les ordonnées discrètes de HU1, et si  $C > 1$ , on a :

$$q_j = \int_{j-1}^j q(t) dt = \left(\frac{j}{C}\right)^3 - \left(\frac{j-1}{C}\right)^3 \quad \text{si } j \leq k$$

et

$$q_{k+1} = 1 - \left(\frac{j-1}{C}\right)^3$$

Si  $C < 1$ ,  $q_1 = 1$  est l'unique ordonnée de HU1. On note  $Q_h$  le flux d'eau cumulé à travers l'hydrogramme unitaire HU1.

5. une deuxième de 10% sera traitée par le deuxième hydrogramme unitaire HU2 et contribuera directement au débit à l'exutoire.

HU2 s'obtient en complétant le premier par symétrie par rapport à la droite  $t=C$ , et en divisant par deux les ordonnées de façon à conserver un volume unitaire.

Les équations de HU2 sont les suivantes :

$$q(t) = \frac{3t^2}{2C^3} \quad \text{pour } 0 \leq t \leq C$$

$$q(t) = \frac{3(2C-t)^3}{2C^3} \quad \text{pour } C < t < 2C$$

$$q(t) = 0 \quad \text{pour } t \geq 2C$$

Soit  $k$  la partie entière de  $C$  et  $i$  la partie entière de  $2C$

Si  $C > 1$ , on a:

$$q_j = \frac{1}{2} \times \left[ \left(\frac{j}{C}\right)^3 - \left(\frac{j-1}{C}\right)^3 \right] \quad \text{si } 1 \leq j \leq k$$

$$q_j = 1 - \frac{1}{2} \times \left[ \left(2 - \frac{j}{C}\right)^3 + \left(\frac{j-1}{C}\right)^3 \right] \quad \text{si } j = k + 1$$

$$q_j = \frac{1}{2} \times \left[ \left(2 - \frac{j-1}{C}\right)^3 - \left(2 - \frac{j}{C}\right)^3 \right] \quad \text{si } k + 2 \leq j \leq i$$

$$q_j = \frac{1}{2} \times \left(2 - \frac{j}{C}\right) \quad \text{si } j \geq k + 2$$

Pour un pas de temps unité, on a :

$$q_1 = 1 - \frac{1}{2} \times \left(2 - \frac{1}{C}\right)^3$$

$$q_2 = \frac{1}{2} \times \left(2 - \frac{1}{C}\right)^3 \quad \text{si } 0.5 \leq C \leq 1$$

Soit alors  $Q_p$  le flux d'eau cumulé après passage par l'hydrogramme unitaire HU2 pour le jour 'i'

6. Le réservoir « eau-gravitaire » reçoit la pluie nette apportée instantanément par HU1 au début du pas de temps, puis le réservoir se vidange graduellement. Si  $R$  est le niveau du réservoir avant l'apport de la pluie 'i', le niveau devient alors :

$$R_1 = R + Q_h$$

7. Un flux échangé avec l'eau souterraine extérieure,  $T$ , est calculé en fonction du paramètre  $D$  exprimé en mm/jour, et pouvant être positif, négatif, ou nul :

$$\text{si } D \geq 0 \quad \text{alors } T = D \cdot \frac{R}{B}$$

$$\text{si } D < 0 \quad \text{alors } T = D \cdot \frac{S}{A}$$

Cet échange avec le milieu souterrain extérieur  $T$  concerne à la fois le réservoir  $R$  et le flux  $Q_p$  qui devient  $Q_k$  :

$$Q_k = \max(0, Q_p - T)$$

et  $R_1$  devient  $R_2$ , donné par la relation :

$$R_2 = \max(\varepsilon, R_1 - T) \quad \text{où } \varepsilon \text{ est un infiniment petit (0.001 mm par exemple)}$$

8. Le réservoir  $R$  relâche le débit  $Q_r(t)$ , selon son niveau, en obéissant à la relation :

$$Q_r = \beta \cdot [R(t)]^\alpha \quad \text{avec } \alpha \geq 1$$

Selon Edijatno (1991) la meilleure valeur de  $\alpha$  est voisine de 5.

De plus, ce débit de vidange est la cause unique, par construction, de la baisse du niveau  $R_2$  du réservoir, donc en appliquant le principe de continuité, il apparaît la relation suivante :

$$Q_r(t) = -\frac{dR_2}{dt} = \beta \cdot [R(t)]^5$$

En intégrant cette expression sur un pas de temps de durée  $\Delta t$  il vient :

$$\frac{1}{R_{2,2}^4} - \frac{1}{R_{2,1}^4} = 4\beta \cdot \Delta t = \frac{1}{B^4} \quad \text{en posant } 4\beta \cdot \Delta t = 1/B^4$$

Par conséquent, le flux  $Q_r$  pour le jour 'i' est donné par la relation :  $Q_r = R_{2,1} - R_{2,2}$

9. Le débit total à l'exutoire est donc :

$$Q=Q_r+Q_k$$

### 2.2.3. Optimisation des paramètres

Le principe est de maximiser le critère de NASH en appliquant la méthode pas à pas décrite précédemment.

Soit  $a=\ln(A)$ ,  $B=\ln(B)$ ,  $c=\ln(C-0.5)$ ,  $d=D$ .

Pour accélérer l'optimisation des paramètres, il est pratique de partir de valeurs estimées a priori.

Une analyse de régression très grossière a donné les relations suivantes ( Edijatno, 1991, Makhlouf, 1994) :

$$a=0.12\ln(SF)+2.23\ln(TA)-0.59$$

$$b=0.17\ln(SF)+1.34\ln(PA)-5.56$$

$$c=0.33\ln(SF)-2.64\ln(TA)+4.78$$

$$d=0$$

où SF est la superficie du bassin, en km<sup>2</sup>, PA est la pluie moyenne annuelle, en mm, et TA est la température moyenne annuelle réduite au niveau de la mer.

### 2.2.4. Période de calage et mise en route

Le modèle permet de restituer les débits calculés à condition de connaître l'état initial au début de la période simulée. Compte tenu du caractère inévitablement arbitraire de cette initialisation, les premières valeurs simulées ne seront pas fiables et par conséquent, on n'en tiendra pas compte dans le calcul de la fonction critère. Cette période doit être assez confortable, et cela d'autant plus que le modèle est plus complexe. Pour simplifier, on utilise systématiquement une année entière pour cette période de mise en route.

Le calage est effectué sur une partie des données, et l'on conserve l'autre partie pour effectuer un contrôle du comportement du modèle. La qualité d'un modèle se mesure autant à la valeur absolue de la fonction critère qu'à la différence de résultat entre la période de calage et celle prise sur une période de contrôle disjointe de la précédente.

### 2.3. Les méthodes de comparaison

Il est habituel d'utiliser en hydrologie le critère de Nash comme critère de qualité car il permet de comparer l'écart quadratique moyen des débits par rapport à la variance, ce qui est le plus souvent étudié. Par conséquent, en premier lieu, nous allons comparer les distributions statistiques des critères de Nash pour chaque option de modélisation, globale et semi-distribuée, et pour chaque bassin versant. En outre, dans la mesure du possible, les périodes d'étude ont été découpées en intervalles de quatre ans, et ceci pour deux raisons :

1. Le faible nombre d'individus en notre possession nous incite à augmenter notre échantillon de valeurs,
2. En découpant les périodes d'étude, on cale systématiquement le modèle sur plusieurs périodes et on le contrôle sur les autres, ce qui nous permet d'intégrer le caractère aléatoire des précipitations, et le risque de caler le modèle sur une période sèche, et le contrôler sur une période humide, et réciproquement. Ainsi, sur une période d'étude de 20 ans, découpée en 5 intervalles, A, B, C, D, E, on obtient, in fine, 20 critères de qualité, correspondant aux périodes de calage-contrôle AB, AC, ..., EC, ED.

Pour l'ensemble des bassins, nous allons comparer deux à deux les critères de Nash des périodes de contrôle pour l'approche globale et pour l'approche semi-distribuée, dans chacun des trois cas. C'est à dire que nous allons comparer les critères de qualités suivants :

$$NASH_{Global} = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{\sum (Q_3^{calc} - Q_3^{obs})^2}{\sum (Q_3^{obs} - Q_3^{moyen})^2} \right]$$

et

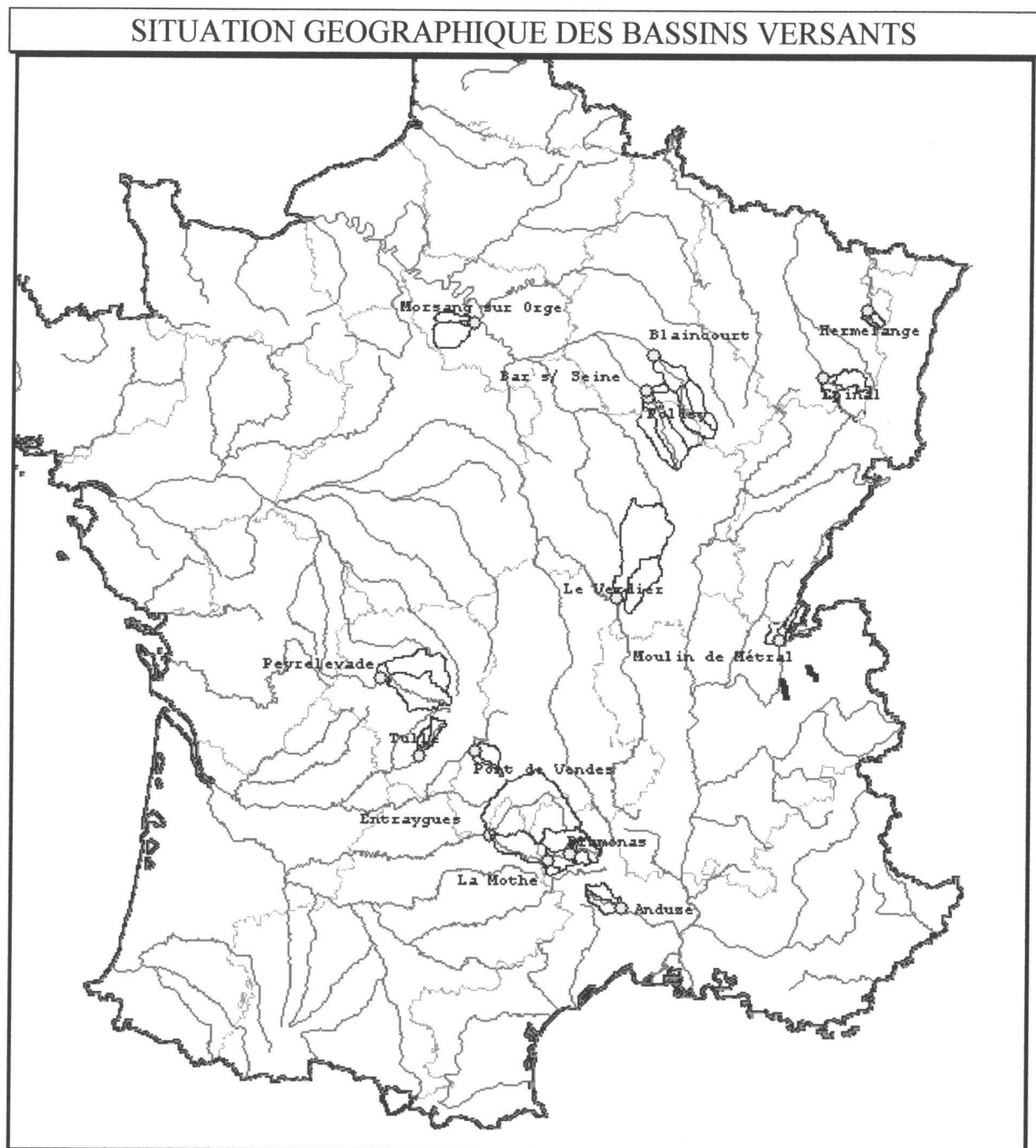
$$NASH_{Distribué} = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{\sum ((\alpha Q_1^{calc} + \beta Q_2^{calc}) - Q_3^{obs})^2}{\sum (Q_3^{obs} - Q_3^{moyen})^2} \right]$$

avec :  $\alpha = \beta = 1$  pour le cas 1 (distribué 0),  
 $\alpha = \beta = e^x$  pour le cas 2 (distribué 1),  
 $\alpha = e^{x_1}$  et  $\beta = e^{x_2}$  pour le cas 3 (distribué 2).

### 3. Les résultats de la modélisation

#### 3.1. Les bassins versants utilisés

En pratique, il y a très peu de situations présentant trois stations de jaugeage à proximité d'une confluence (figure 2b). Aussi, après une recherche minutieuse, région par région, cours d'eau par cours d'eau, nous en avons recensé 15. La faiblesse de cet échantillon, qui représente pourtant la quasi totalité des cas, nous a contraint à ne négliger aucune configuration (cf. figure n°4 et tableau n°1).



(figure n°4)

Fichier	Code Hydro	Station	Cours d'eau	Dpt	BV(km <sup>2</sup> )	Période d'étude	% BV interméd.
MOSELLE	A 900101	Laneuveville	Sarre-Blanche	57	64,2	1968-1994	19,5
	A 901301	Vasperviller	Sarre-Rouge	57	90,4		
	A 902101	Hermelange	Sarre	57	192		
AUBE	H 0100020	Plaines st Lange	Seine	10	704	1968-1983	9,1
	H 0203020	Molesmes	Laignes	21	614		
	H 0210010	Polisy	Seine	10	1450		
COTE D'OR	H 021001	Polisy	Seine	10	1450	1969-1992	6,8
	H 032104	Celles s/ Ource	Ource	10	730		
	H 040001	Bar s/ Seine	Seine	10	2340		
SAONE	K 134181	Rigny	Arroux	71	2277	1967-1994	2,2
	K 138521	Vitry en Charollais	Bouhince	71	819		
	K 139181	Le Verdier	Arroux	71	3166		
LOZERE2	O 704151	Bramonas	Lot	48	465	1971-1994	20,9
	O 709401	Le Monastier	Colagne	48	456		
	O 710151	La Mothe	Lot	48	1164		
AVEYRON	O 7191510	Entraygues 1	Lot	12	2180	1979-1991	0,0
	O 7692510	Entraygues 2	Truyère	12	3280		
	O 7701510	Entraygues 3	Lot	12	5460		
LOZERE	O 702153	Mende	Lot	48	250	1974-1991	21,3
	O 703501	Les Fonts	Bramont	48	116		
	O 704151	Bramonas	Lot	48	465		
CANTAL	P 0874020	Pont de Vendes 1	Sumène	15	284	1961-1969	0,0
	P 0885010	Pont de Vendes 2	Mars	15	117		
	P 0894010	Pont de Vendes 3	Sumène	15	401		
CORREZE	P 3464010	Moulin du Bos	Vimbelle	19	147	1961-1981	11,8
	P 3352510	Corrèze	Corrèze	19	167		
	P 3522510	Tulle	Corrèze	19	356		
AIN	V 101503	Chézery	Valserine	01	119	1961-1983	23,5
	V 101581	Coz	Semine	01	183		
	V 101504	Moulin de Métral	Valserine	01	395		
GARD	V 7135020	Corbes	Gardon St Jean	30	263	1970-1979	8,1
	V 7124010	Roucan	Gardon de Mialet	30	239		
	V 7144010	Anduze	Gardon d'Anduze	30	546		
VIENNE	L0321510	Saint Priest	Taurion	87	1030	1980-1995	4,8
	L0140610	Saint Priest	Vienne	87	1156		
	L0400610	Peyrelevade	Vienne	87	2296		
ESSONNE	H4243010	Villebon	Yvette	91	224	1982-1994	7,2
	H4232040	Le Breuil	Orge	91	632		
	H4252010	Morsang s/ Orge	Orge	91	922		
AUBE 2	H1122010	Rennepont	Aujon	52	481	1972-1984	30,6
	H1051020	Outre Aube	Aube	10	657		
	H1231010	Blaincourt	Aube	10	1640		
VOSGES	A4200630	Noir Gueux	Moselle	88	621	1970-1980	18,8
	A4362010	Jarmenil	Vologne	88	369		
	A4250640	Epinal	Moselle	88	1219		

(tableau n°1)

Les quinze bassins ont un bassin intermédiaire qui représente entre 0 et 30% de la taille du bassin total.



Chaque bassin a donc été modélisé, avec le modèle GR4J, selon les quatre cas : global, distribué 0, distribué 1, distribué 2. Tous les résultats (critères de Nash obtenus pour chaque période de contrôle) sont présentés en annexe (n°1), et le tableau ci-dessous donne les moyennes et variances des échantillons pour chaque bassin et chaque approche :

cours d'eau	Aube		Cantal		Gard		Corrèze		Vienne		Côte d'Or		Lozère		Aveyron	
	Seine		Sumène		Gardon		Corrèze		Vienne		Seine		Lot		Lot	
	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var
Global	89,1	12,7	84,3	12,5	84,7	30,5	91,4	6,2	89,5	1,9	90,9	16,9	86,1	7,8	64,5	77,0
Distrib 0	89,4	4,0	85,5	7,4	87,7	11,1	91,0	7,4	89,7	1,3	91,3	11,8	85,1	9,2	66,3	28,4
Distrib 1	90,5	7,1	85,9	9,2	85,8	24,8	91,3	6,2	89,8	1,3	91,5	12,6	85,9	8,5	66,7	41,3
Distrib 2	89,0	12,4	86,4	8,8	86,0	23,4	91,8	5,6	89,8	1,3	91,7	11,5	86,1	9,4	66,9	41,1

cours d'eau	Ain		Lozère 2		Saône		Moselle		Essonne		Aube 2		Vosges		SOMME des BV	
	Valserine		Lot		Arroux		Sarre		Orge		Aube		Moselle			
	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var
Global	62,1	85,3	83,8	23,4	92,7	2,1	76,5	106,2	55,6	213,9	93,5	0,7	87,9	19,1	82,2	144,1
Distrib 0	57,5	78,8	83,1	19,8	93,2	1,2	10,7	835,1	58,2	315,3	92,4	0,9	88,8	13,3	78,0	490,5
Distrib 1	58,0	84,5	83,1	20,1	93,2	1,6	55,1	45,3	68,3	35,2	92,7	0,9	89,4	13,5	81,8	169,3
Distrib 2	59,2	75,7	82,6	19,9	93,2	1,4	55,3	40,4	66,1	94,8	92,9	0,8	89,4	13,7	81,7	168,4

(tableau n°2)

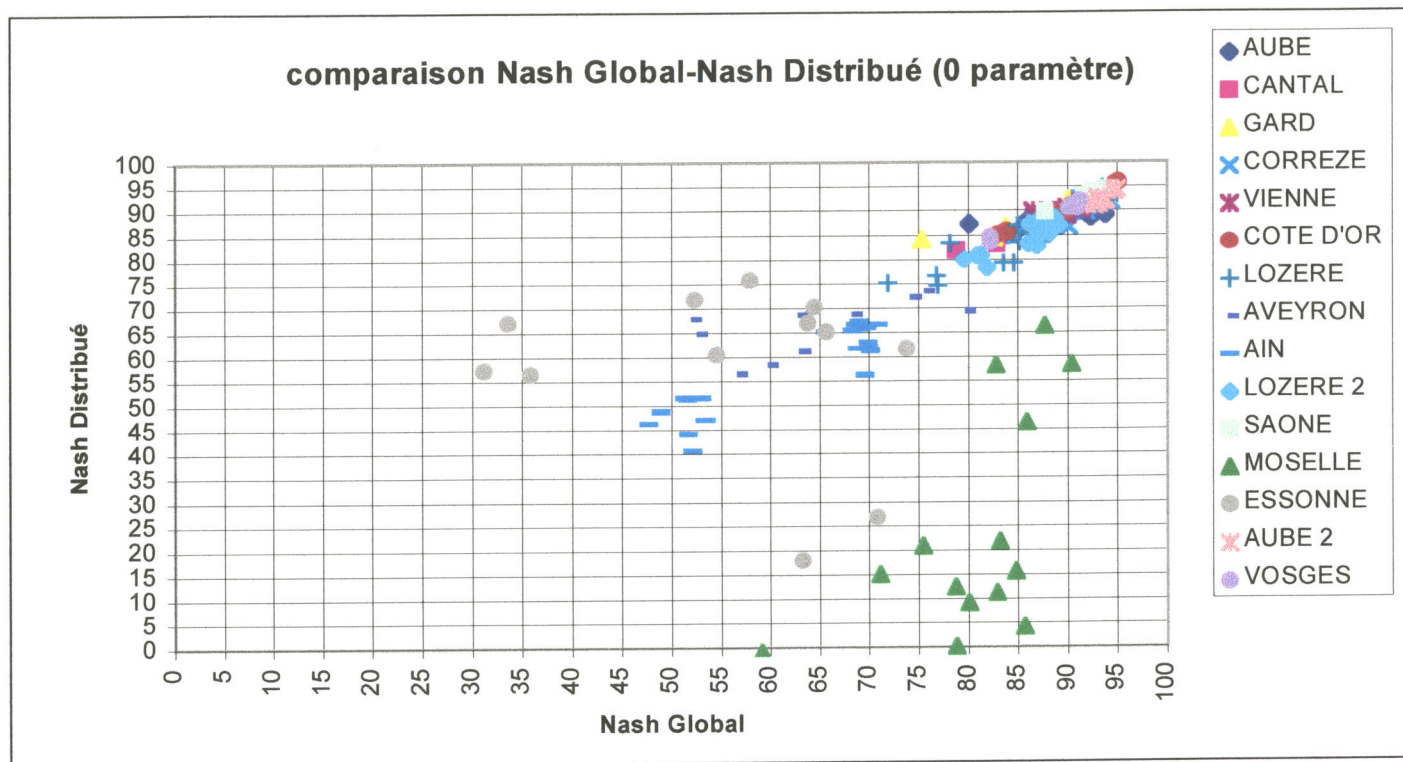
Une rapide analyse de ce tableau montre que, si l'approche semi-distribuée n'engendre pas des critères de Nash très supérieurs à ceux de l'approche globale, les variances sont souvent plus petites. Ce qui semble signifier que la partition d'un bassin versant entraîne une plus grande stabilité des résultats dans la modélisation pluie-débit.

Une anomalie toutefois : le bassin MOSELLE, où la simple agglomération des débits donne de très mauvais résultats, ce qui augmente la variance calculée pour la somme des bassins.

### 3.2. Comparaison qualitative

Une première technique, la plus simple, est d'observer le nuage des points défini par les échantillons des critères de Nash, pour les différentes approches. Sur un graphe situant en abscisse les valeurs obtenues pour l'approche globale, et en ordonnée, celles obtenues avec l'approche semi-distribuée, la situation de ce nuage de point par rapport à la première bissectrice permet une première confrontation des deux approches. Si le nuage de points se trouve globalement au dessus de la première bissectrice, l'approche semi-distribuée est meilleure, et si c'est l'inverse, l'approche globale est meilleure.

Le graphe ci-dessous présente la comparaison entre le modèle global et le modèle distribué 0. Les autres, correspondant aux modèles distribués 1 et 2 sont présentés en annexe (n°1).



(figure n°5)

Pour l'ensemble des quinze bassins, cette technique ne montre pas une différence visuelle significative entre l'approche globale et l'approche semi-distribuée. L'agglomération des points autour de la première bissectrice, comme le montre le graphique ci-après, ainsi que ceux figurant en annexe (n°1), atteste de cette conclusion.

Cependant, nous pouvons d'ores et déjà signaler que l'approche globale est meilleure pour le bassin « MOSELLE », dans tous les cas de figure, tandis que l'approche semi-distribuée est préférable pour le bassin « ESSONNE ». Pourquoi ?

Nous avancerons ici que dans le cas « MOSELLE », on se trouve en région péri-montagneuse où les précipitations neigeuses peuvent être importantes. Par conséquent, sur l'un des deux sous bassins, le modèle peut avoir quelques difficultés à optimiser ses paramètres. Dans le cas « ESSONNE », l'Yvette est une rivière de nappe, c'est à dire que son débit est relativement peu influencé par les précipitations. Par conséquent, il est plus judicieux de caler certains paramètres sur le premier cours d'eau, et d'en prendre d'autres pour le second.

Nous ne pouvons, à ce stade de l'étude, aller plus loin dans l'analyse de ces bassins.

### 3.3. Analyse statistique

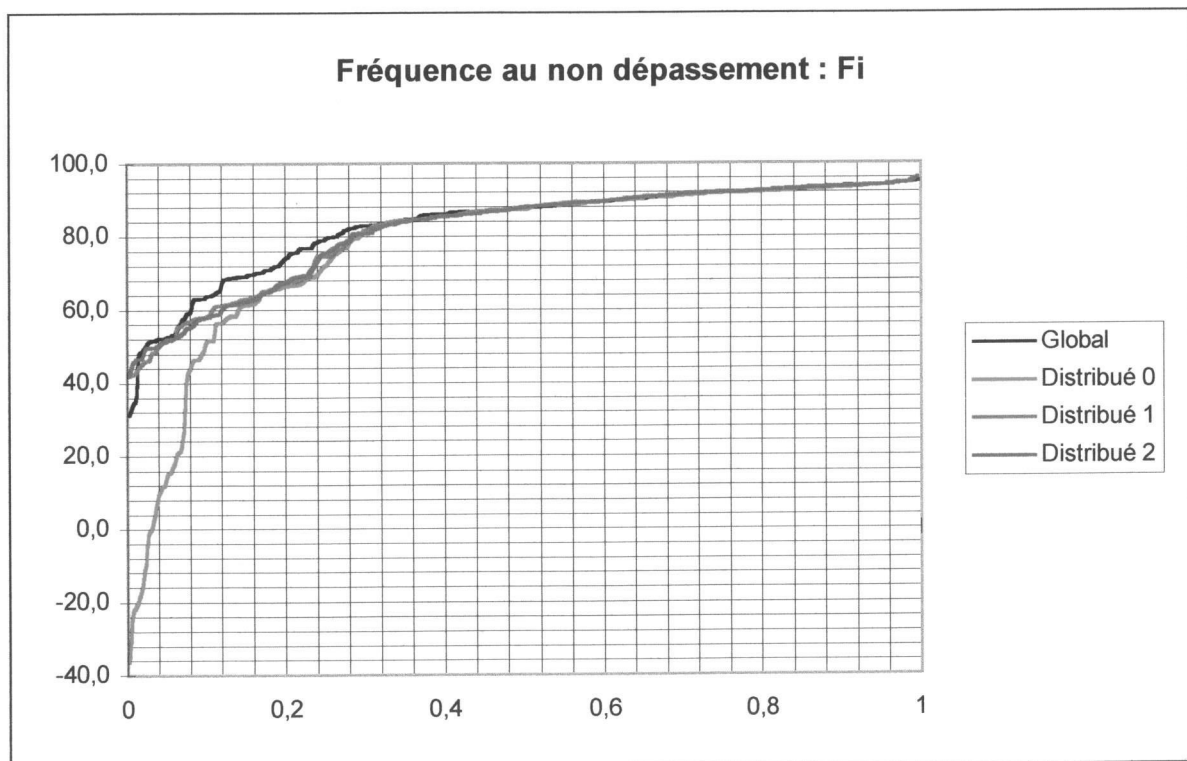
#### 3.3.1. Fréquence au non dépassement : $F_i$

Pour comparer la meilleure approche, il est possible d'observer la distribution des critères de Nash par rapport à un quantile. Il faut pour cela tracer les graphes des fréquences au non dépassement pour chaque population de critères de Nash, indépendamment de l'appartenance aux différents bassins, soit au total, pour chaque approche, 244 valeurs. Cette distribution expérimentale est calculée ici grâce à la formule de Chedogayev :

$$F_i = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

avec  $i$  = rang de la variable,

$n$  = taille de l'échantillon.



(figure n°6)

Ainsi, l'analyse de la figure n°6 et du tableau n°3 montre que selon le quantile considéré, les conclusions changent. En effet, les quantiles 0,1 et 0,3 laissent penser que l'approche globale est légèrement meilleure que l'approche semi-distribuée : 90% des valeurs du global sont supérieures à 63,5% contre 58,6% dans le meilleur des cas pour l'approche semi-distribuée. De même 70% des valeurs du global sont supérieures à 83% contre 81,6%

pour le distribué. En revanche, le quantile 0,5 montre une inversion de tendance : 50% des valeurs sont supérieures à 88,1% pour l'approche semi-distribuée, contre 87,7% pour le global.

Nash	Quantile 0,1	Quantile 0,3	Quantile 0,5
Global	63,5	83	87,7
Distribué 0	51,3	81,1	87,4
Distribué 1	58,3	81,6	88,0
Distribué 2	58,1	80,9	88,1

(tableau n°3)

Par conséquent, il n'y a pas de différence significative entre les différentes approches, du point de vue de la fréquence au non dépassement.

### 3.3.2. Statistique de Wilcoxon

Le test de Wilcoxon est un test non paramétrique. Il est utilisé lorsqu'on est en présence de deux échantillons provenant de deux populations. Son but est de vérifier s'il existe des différences entre les deux populations sur la base d'échantillons aléatoires tirés de ces populations.

Soit  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  un échantillon de taille  $n$  provenant d'une population 1 et soit  $(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$  un échantillon de taille  $m$  provenant d'une population 2. On obtient ainsi  $N=n+m$  observations que l'on va classer dans un ordre croissant sans tenir compte de l'appartenance aux échantillons. On attribue ensuite un rang 1 à la plus petite valeur, un rang 2 à la valeur juste supérieure, et ainsi de suite jusqu'au rang  $N$  attribué à la plus grande valeur. On note  $R(X_i)$  le rang attribué à  $X_i$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Si plusieurs observations ont exactement la même valeur, on leur attribuera un rang moyen.

La statistique  $T$  du test est définie par :  $T = \sum_{i=1}^n R(X_i)$

Si la taille des échantillons est grande, ( $m+n>12$ ), on utilise, selon Gibbons (1971), une approximation en considérant la statistique  $T_1$  supposée suivre une loi normale standard  $\mathcal{N}(0;1)$  :

$$T_1 = \frac{T - \mu}{\sigma},$$

où  $\mu$  et  $\sigma$  sont respectivement la moyenne et l'écart-type de la variable aléatoire  $T$  :

$$\mu = \frac{n \cdot (N + 1)}{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{mn \cdot (N + 1)}{12}}$$

Si on utilise l'approximation pour les grands échantillons et qu'il y a des rangs ex-aequo parmi les  $N$  observations, on remplace l'écart-type par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{mn}{12} \cdot \left( N + 1 - \frac{\sum_{i=1}^g t_i \cdot (t_i^2 - 1)}{N(N-1)} \right)}$$

où  $g$  est le nombre de groupes de rangs ex-aequo et  $t_i$  la taille du groupe  $i$ .

Le test de Wilcoxon peut être effectué sur la base d'un test bilatéral ou d'un test unilatéral, selon le type d'hypothèse :

A : Cas bilatéral

$$H_0 : P(X < Y) = \frac{1}{2}$$

$$H_1 : P(X < Y) \neq \frac{1}{2}$$

Il exprime l'hypothèse qu'il n'y a pas de différence entre les deux populations.

On rejettera l'hypothèse nulle  $H_0$  au seuil de signification  $\alpha$  si  $T$  est inférieur à la valeur de la table de Wilcoxon avec les paramètres  $n$ ,  $m$  et  $\frac{\alpha}{2}$  ou si  $T$  est plus grand que la valeur de la

table pour  $n$ ,  $m$  et  $1 - \frac{\alpha}{2}$ , c'est à dire si :

$$T < t_{n,m,\frac{\alpha}{2}} \quad \text{ou} \quad T > t_{n,m,1-\frac{\alpha}{2}}$$

Si le test utilise la statistique  $T_I$ , la comparaison se fait avec la table normale :

$$T_1 < z_{\frac{\alpha}{2}} \text{ ou } T_1 > z_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

B : Cas unilatéral du premier type

$$H_0 : P(X < Y) \leq \frac{1}{2}$$
$$H_1 : P(X < Y) > \frac{1}{2}$$

Il représente l'hypothèse que la population 1 ( d'où est tiré l'échantillon des X) admet en général des valeurs plus grandes que celles de la population 2 ( d'où est tiré l'échantillon des Y).

On rejettera l'hypothèse nulle  $H_0$  au seuil de signification  $\alpha$  si  $T$  est inférieur à la valeur de la table de Wilcoxon avec les paramètres  $n$ ,  $m$  et  $\alpha$ , c'est à dire si :

$$T < t_{n,m,\alpha}$$

et dans le cas où la statistique  $T_I$  est utilisée :

$$T_1 < z_{\alpha}$$

C : Cas unilatéral du deuxième type

$$H_0 : P(X < Y) \geq \frac{1}{2}$$
$$H_1 : P(X < Y) < \frac{1}{2}$$

Ce cas exprime l'hypothèse contraire à B, c'est à dire que les valeurs de la population 1 ont tendance à être plus petites que celles de la population 2.

On rejettera l'hypothèse nulle  $H_0$  au seuil de signification  $\alpha$  si  $T$  est supérieur à la valeur de la table de Wilcoxon avec les paramètres  $n$ ,  $m$ ,  $1-\alpha$ , c'est à dire si :

$$T > t_{n,m,1-\alpha}$$

et avec la statistique  $T_I$  :

$$T_1 > z_{1-\alpha}$$

Nous avons effectué les tests B et C sur chacun des bassins, pour chacune des approches semi-distribuées comparées à l'approche globale.



Dans le cas B, nous avons testé l'hypothèse  $H_0$  : les valeurs issues de l'approche globale ont tendance à être plus grandes que les valeurs obtenues pour les approches semi-distribuées. Plus petites dans le cas C.

Le tableau ci-dessous, (n°4), donne les valeurs de  $z$  en fonction des trois valeurs de seuils de signification :

$\alpha$	$Z_\alpha$	$Z_{1-\alpha}$
5%	-1.645	1.645
10%	-1.282	1.282
20%	-0.842	0.842

(tableau n°4)

Le mode de calcul pour les deux tests est le même, c'est pourquoi les valeurs obtenues pour la variable T1 de Wilcoxon sont identiques dans les deux cas. Seule la comparaison avec le seuil de signification change.

Les résultats du test sont regroupés dans le tableau suivant (n°5).

<b>Valeurs de T1 dans la statistique de Wilcoxon</b>			
<b>Bassins</b>	<b>Global-Distribué 0</b>	<b>Global-Distribué 1</b>	<b>Global-Distribué 2</b>
AUBE	-1.137	0.054	0.054
CANTAL	-0.48	-0.48	-0.48
GARD	-1.281	-1.281	-1.281
CORREZE	0.444	0.074	0.059
VIENNE	-0.948	-1.219	-1.219
COTE D'OR	0.054	-0.081	-0.081
LOZERE	0.839	1.209	1.209
AVEYRON	-0.837	-0.866	-0.866
AIN	2.449	2.381	2.381
LOZERE 2	1.177	1.055	1.055
SAONE	-1.408	-1.652	-1.625
MOSELLE	5.275	5.274	5.275
ESSONNE	-0.693	-0.693	-0.693
AUBE 2	2.629	2.543	2.543
VOSGES	-0.802	-0.802	-0.802
<b>MOYENNE</b>	<b>0.021</b>	<b>-0.166</b>	<b>-0.207</b>

(tableau n°5)

Ici, MOYENNE représente l'échantillon obtenu à partir des moyennes des populations des critères de Nash obtenus pour chaque bassin, afin d'éliminer l'influence des bassins possédant beaucoup de données par rapport aux autres. C'est donc un échantillon de 15 valeurs pour le global, 15 valeurs pour le distribué 0, ...etc...que nous avons testé.

Les valeurs négatives de  $T_i$  signifient que l'approche semi-distribuée est meilleure que l'approche globale ( les valeurs de l'échantillon de la population « approche globale » sont en général plus petites que celles de l'échantillon de la population « approche semi-distribuée » ). Mais comme le montre le tableau, au seuil de signification 5%, on ne peut pas considérer qu'il existe une différence significative, sauf pour les bassins AIN, MOSELLE et AUBE 2 où l'approche globale l'emporte dans tous les cas de figure, et le bassin SAONE, où l'approche semi-distribuée est meilleure, dans tous les cas au seuil 10%, et dans les cas 2 et 3, au seuil 5%.

Au seuil 20%, il y a une différence significative dans tous les cas de figure pour les bassins AIN (global), AUBE 2 (global), GARD (distribué), LOZERE 2 (global), MOSELLE (global), SAONE (distribué) et VIENNE (distribué). Le global est significativement meilleur que les distribués 1 et 2, au seuil 20%, pour le bassin LOZERE, tandis que les approches distribuées 1 et 2 sont significativement meilleures que l'approche globale pour le bassin AVEYRON, au même seuil. Enfin, le distribué 0 est significativement meilleur que le global pour le bassin AUBE.

Par conséquent, outre le fait que le seuil 20% assez grand pour espérer des résultats probants, aucune tendance générale ne se dégage de cette étude statistique.

Les traitements statistiques ne font que confirmer le faible écart entre l'approche globale et les approches distribuées.

## 4. Le modèle Semi-distribué

Dans tout ce qui précède, nous avons à chaque fois comparé un modèle global avec différentes configurations d'un modèle semi-distribué. Or, le but de cette étude est d'étudier une approche globale et une approche semi-distribuée dans la modélisation pluie-débit. Il ne faut donc pas perdre de vue que les trois modèles semi-distribués appartiennent à la même approche. Par conséquent, l'idéal serait d'avoir en notre possession un second échantillon de bassins afin d'établir sur le premier, et contrôler sur le second, une méthode permettant de définir quel cas convient le mieux, selon la disposition des sous-bassins, pour l'approche semi-distribuée.

Ne possédant pas ce second échantillon, nous allons observer les moyennes et variances des échantillons des critères de Nash obtenus lors de la modélisation. Le meilleur modèle semi-distribué sera celui donnant la meilleure moyenne et/ou la plus faible variance. A partir de cette analyse, nous construirons une méthode a priori, en gardant à l'esprit qu'elle n'est pas validée de manière rigoureuse.

Le modèle distribué 0 donne les meilleurs résultats pour les bassins AVEYRON, CANTAL, GARD, SAONE et VIENNE.

Le modèle distribué 1 donne les meilleurs résultats pour les bassins AUBE, ESSONNE, LOZERE, LOZERE 2, VOSGES.

Le modèle distribué 2 donne les meilleurs résultats pour les bassins AIN, AUBE 2 CORREZE, COTE D'OR et MOSELLE.

Par construction :

*Si le bassin intermédiaire est inférieur à 5% de la surface totale, on ne fera aucune correction des débits amonts.*

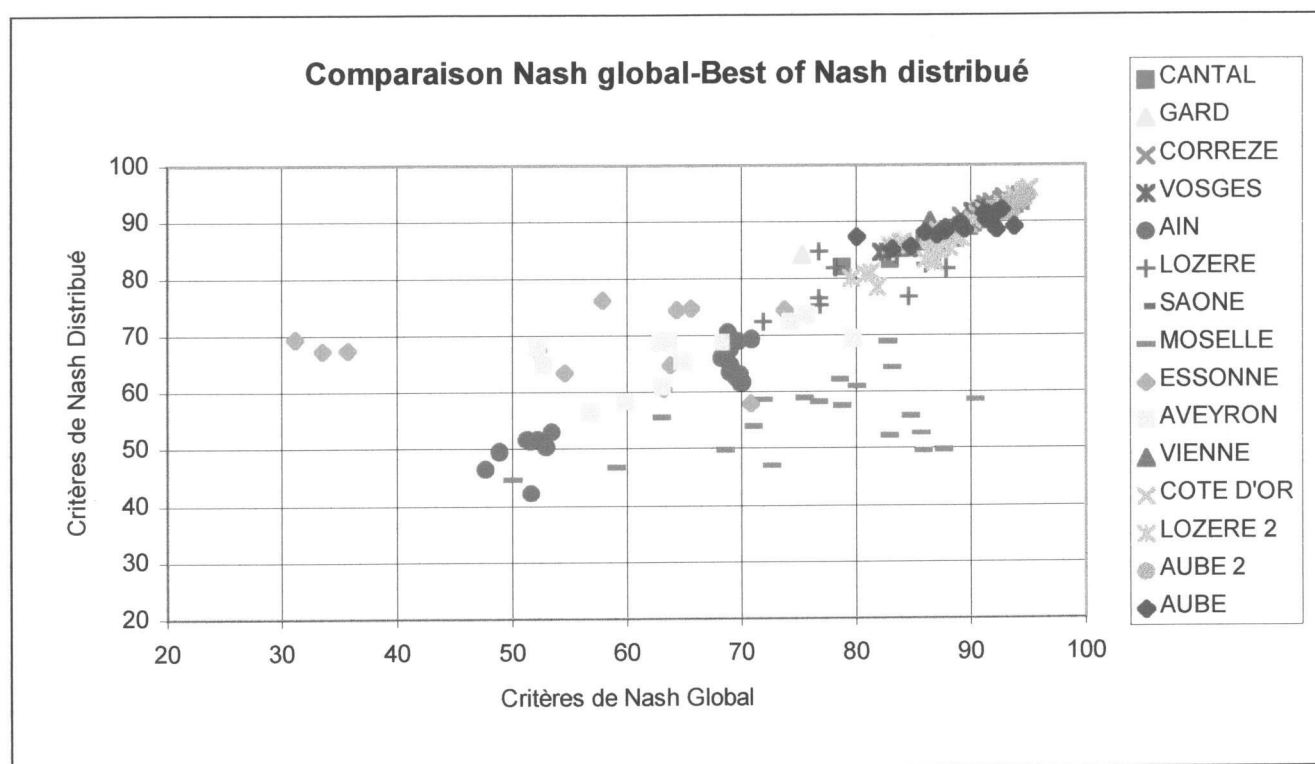
*Si le bassin intermédiaire est supérieur à 10% de la surface totale, on corrigera les débits à l'aide d'une ou deux constantes multiplicatives avant de les sommer. Une seule constante si le bassin intermédiaire est à l'aval de la confluence. Une seule constante aussi s'il est à l'amont, mais qu'après avoir tracé deux nouveaux sous bassins dont les exutoires seraient situés juste à la confluence, on peut attribuer équitablement ses effets à chacun des deux sous-bassins initiaux. Deux constantes sinon.*

*Si le bassin intermédiaire est compris entre 5% et 10% de la surface totale, on n'utilisera aucune constante s'il est à l'aval de la confluence. Si le bassin intermédiaire est à*

*l'amont de la confluence, on utilisera une ou deux constantes en procédant comme précédemment.*

C'est ainsi que le modèle « Best of Distribué » est défini.

Le nuage de points défini par les couples de critères de Nash pour l'approche globale en abscisse et l'approche semi-distribuée en ordonnée est représenté sur le graphique n°7.



(figure n°7)

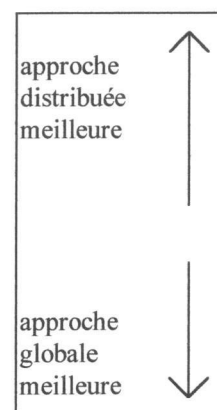
Dans le cas présent, on remarque que lorsque la valeur du critère de Nash diminue, et devient inférieure à 50%, le modèle semi-distribué est meilleur.

Dans le cas de la statistique de Wilcoxon, seul l'échantillon des moyennes nous intéresse, et le critère de Wilcoxon donne une valeur de -0,270. Par conséquent, la différence n'est pas significative.

Le fait d'avoir ce modèle Best of Distribué nous permet d'établir un classement entre les résultats de l'approche globale et ceux de l'approche semi-distribuée. Bien que la différence ne soit pas significative, nous pouvons dorénavant ranger les bassins en fonction du critère T1 de Wilcoxon (tableau n°6).

Dans ce tableau, on donne aussi la valeur du critère pour le bassin « MOYENNE ». Pour mémoire, ce bassin représente l'échantillon des moyennes des critères de Nash par bassin, et non pas la moyenne des valeurs du tableau.

Bassins	T1 de Wilcoxon
SAONE	-1,408
GARD	-1,281
VIENNE	-0,948
AVEYRON	-0,837
VOSGES	-0,802
ESSONNE	-0,693
CANTAL	-0,480
COTE D'OR	-0,081
AUBE	0,054
CORREZE	0,059
LOZERE 2	1,177
LOZERE	1,209
AIN	2,381
AUBE 2	2,543
MOSELLE	5,275
« MOYENNE »	-0,270



(tableau n°6)

## 5. Un exemple concret : le bassin AVEYRON

L'exemple traité ici est presque le cas parfait d'une maille scindée en deux : à Entraygues, la Truyère rejoint le Lot, et ces deux unités hydrographiques sont assez équilibrées car la superficie géographique et le volume des mesures hydrologiques y sont d'importances comparables.

-Le Lot à l'amont du confluent de la Truyère a un bassin versant de 2200 km<sup>2</sup>;

-La Truyère à l'amont du confluent du Lot a un bassin versant de 3300 km<sup>2</sup>.

Par contre, elles ont des caractéristiques propres (relief, climatologie, géologie) assez homogènes et nettement différentes. C'est pourquoi, cet exemple, qui a la particularité de ne pas avoir de bassin intermédiaire, va nous permettre d'introduire les caractéristiques que nous avons choisies pour définir les bassins.

### 5.1. La modélisation

Le bassin du Lot a été testé sur la période 1979-1991, soit 13 années, découpées en 4 intervalles de quatre ans :

A : 1979-1982;

B : 1982-1985;

C : 1985-1988;

D : 1988-1991;

Nous avons en outre utilisé 28 pluviomètres, répartis sur toute la surface et dont les données couvrent les treize années d'étude. Onze d'entre eux sont situés sur le bassin du Lot, soit un pluviomètre pour 200 km<sup>2</sup>, les dix sept autres étant sur le bassin de la Truyère, c'est à dire un pluviomètre pour 195 km<sup>2</sup>.

Les résultats de la modélisation par GR4J pour le global et le semi-distribué (dans le cas 1 car il n'y a pas de bassin intermédiaire, donc les autres cas n'ont pas lieu d'être) sont regroupés dans le tableau n°7 de la page suivante.

Le modèle semi-distribué étudié ici est celui ne comportant pas de constante multiplicative puisque le bassin intermédiaire est inexistant.

Il faut noter que dans la modélisation décrite à la partie 2, nous avons obtenu des résultats différents pour ce bassin avec les deux autres modèles semi-distribués. Ceci est dû au fait que les débits calculés ne sont pas exactement les débits observés, donc le modèle cale une ou deux constantes, selon les cas, pour minimiser cette différence.

période	Nash global	Nash distribué
AB	63.1	61.1
AC	62.9	68.7
AD	52.2	67.9
BA	79.8	69.5
BC	64.8	65.2
BD	52.7	64.8
CA	75.7	73.6
CB	59.9	58.4
CD	63.7	69.1
DA	74.3	72.4
DB	56.8	56.5
DC	68.4	68.8
<b>moyenne</b>	<b>64.5</b>	<b>66.3</b>
<b>variance</b>	<b>77.0</b>	<b>28.4</b>

(tableau n°7)

L'analyse rapide de ce tableau montre que l'approche semi-distribuée donne de meilleurs résultats, et avec une plus grande stabilité (la variance est divisée par trois) que l'approche globale. De plus, statistiquement, un test de Wilcoxon sur les résultats de la modélisation conclut à une supériorité de l'approche semi-distribuée sur l'approche globale, au seuil de signification 20%. En effet, la variable de Wilcoxon dans ce cas vaut  $t_1 = -0,837$  et  $z_{(20\%)} = -0,841$  alors que  $z_{(21\%)} = -0,806$ .

Un test statistique à un seuil de signification plus faible ne nous permet pas de conclure, et une incertitude de 20% est trop élevée pour ne pas être sujette à discussion. Aussi, nous allons analyser les caractéristiques physiques des deux sous bassins, pour rechercher un éventuel lien avec les résultats de la modélisation, et voir s'il y a effectivement lieu d'opérer un découpage.



## 5.2. Caractéristiques physiques des bassins

### 5.2.1. La pédologie

On rencontre deux grands types de paysages dans ce bassin : la montagne du Massif Central et les Causses.

De plus, la nature pédologique du bassin influence fortement ces paysages. Ainsi, les sous-bassins sont essentiellement constitués de sols bruns, caractéristiques des régions à climat tempéré semi-continentale, dont la végétation naturelle est une forêt feuillue ou une forêt mixte résineux feuillus ( cf. § 5.2.3.), dans les basses montagnes. Mais, une analyse plus fine permet de cerner quelques différences sur la nature du sol entre les deux sous bassins (tableau n°8).

	Lot	Truyère
Rankers pseudo-alpins, rankers à mor	7%	12.4%
Sols bruns lessivés et sols bruns acides	17.6%	6.2%
Sols bruns acides et lithosols	11.7%	23.6%
Sols ocre podzoliques et sols bruns acides	22.4%	29.1%
Sols bruns eutrophes	1.8%	2.1%
Sols bruns acides	3.4%	25.1%
Sols de tourbières	1%	1.5%
Sols bruns calcaires et rendzines rouges	19.1%	0
Sols bruns lessivés, rendzines rouges et lithosols	16.0%	0

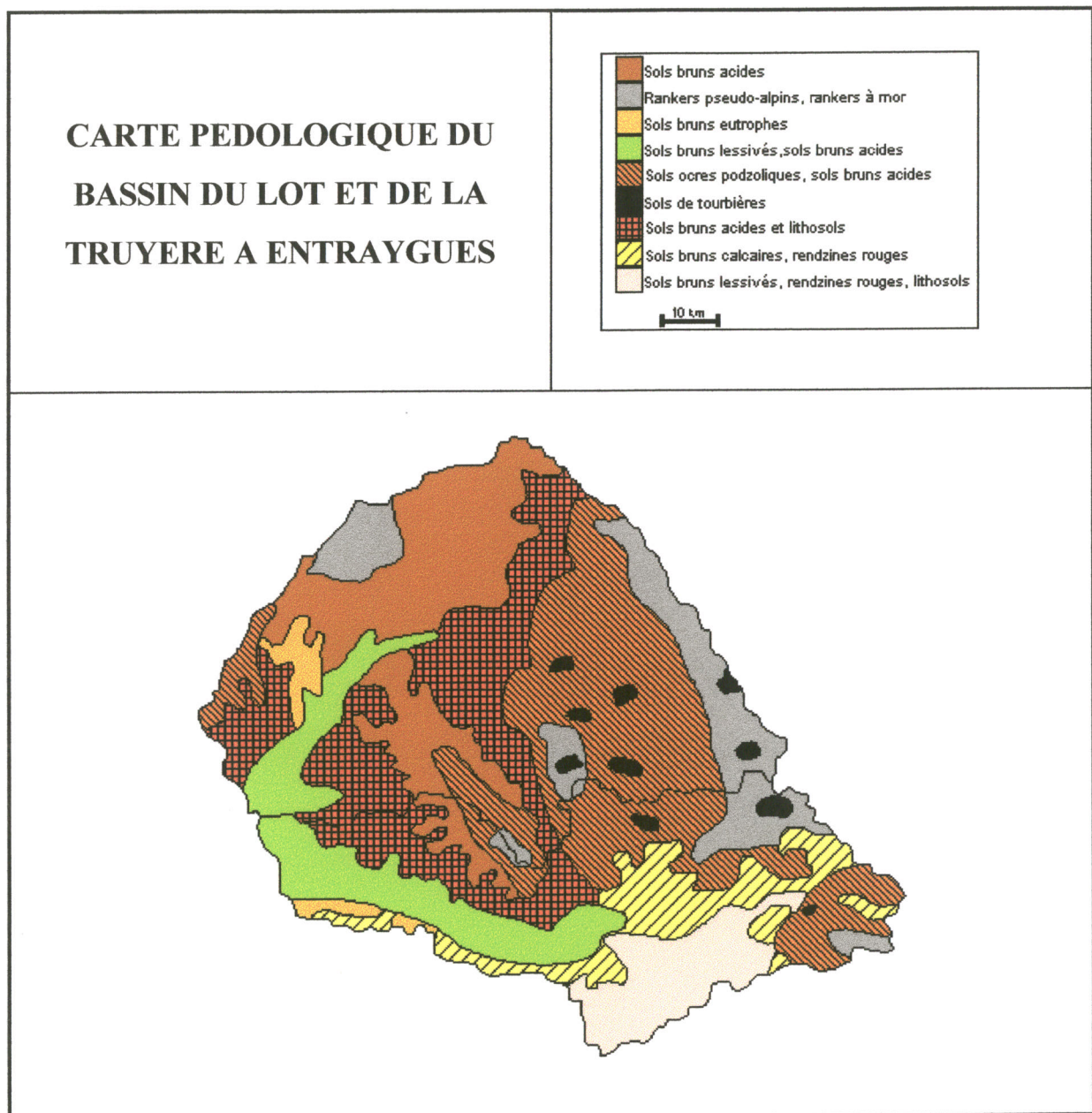
(tableau n°8)

On remarque en effet que le bassin du Lot se distingue par sa forte proportion de sols bruns lessivés et rendzines rouges, tandis que le bassin de la Truyère est essentiellement constitué de sols bruns acides.

Les sols bruns sont dans l'ensemble des sols favorables à la végétation, mais les sols bruns acides présentent un ensemble de propriétés, tant physiques que chimiques nettement défavorables. Les argiles plus ou moins dégradées n'ont qu'une faible capacité d'échange; ainsi, en montagne, les sols bruns acides sont généralement voués à la forêt ou à la prairie. Ces sols étant superficiels et souvent trop secs, la prairie se localise de préférence sur les versants frais, tandis que la forêt, souvent dégradée et clairière occupe les versants chauds.

Les sols bruns lessivés, eux, se forment par lessivage d'argiles ferrugineuses provenant d'une couche meuble épaisse, le plus souvent dans la partie centrale d'une cuvette de solifluxion (dépression entourée de pentes faibles). En outre, la porosité y est généralement élevée.

La représentation cartographique de la pédologie, figure n°8, permet de mieux visualiser les différences entre les deux bassins.



(figure n°8)

### 5.2.2. La géologie

D'un point de vue géologique, deux grands types de formations affleurent sur le bassin du Lot avec des extensions équivalentes :

- les terrains sédimentaires, dont l'âge va du Primaire au Quaternaire, mais où dominent les calcaires du Jurassique (Causses);
- les formations cristallines, métamorphiques et volcaniques, ces dernières étant d'origine récente (Pliocène) alors que les premières sont au contraire très anciennes.

Les deux bassins se distinguent par leur composition géologique : le bassin du Lot est beaucoup plus calcaire que celui de la Truyère, et inversement on rencontre beaucoup plus de roches volcaniques sur ce dernier que sur le premier cité.

Les formations géologiques présentes sur le bassin se répartissent en surface comme suit (tableau n°9) :

	Lot	Truyère
Schistes et grès	4%	0
Calcaires (Jurassique essentiellement)	34%	0
Argiles et marnes	0	7%
Roches Volcaniques (basaltes, andésites, trachytes...)	9%	31%
Roches Cristallines (granites) et Cristalloglyliennes (gneiss)	53%	62%

(tableau n°9)

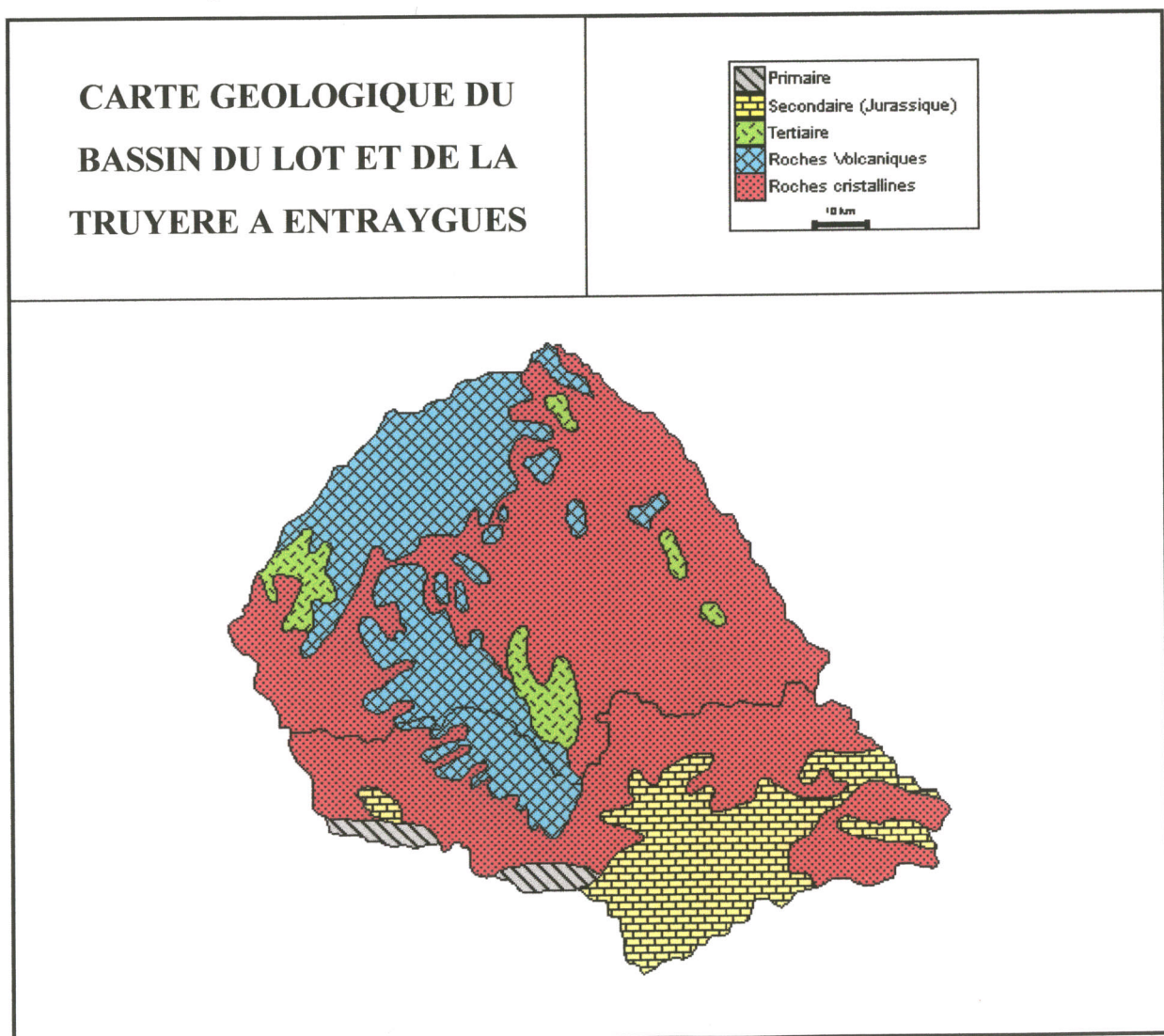
Ces caractéristiques géologiques ont une grande influence sur l'hydrologie :

- les calcaires des Causses sont très perméables; leur karstification est souvent intense. Presque toutes les eaux de pluie s'y infiltrent en profondeur immédiatement : elles alimentent des nappes karstiques et ressortent à la périphérie des plateaux en grosses sources au régime contrasté (directement et rapidement lié aux débits infiltrés) mais conservent des débits d'été importants (10 à 100 l/s);
- les roches métamorphiques (cristalloglyliennes) sont en général imperméables; elles ne renferment pas de nappes, ni par conséquent de sources importantes. Le ruissellement y est très important en hiver et au printemps, mais la plupart des ruisseaux s'assèchent complètement en été. Les terrains cristallins (granitiques) ont un comportement hydrologique particulier lié à la présence fréquente d'une couche altérée assez perméable, jouant un rôle d'amortisseur, qu'il est difficile de

quantifier mais sans doute assez faible. Leur extension est d'ailleurs limitée sur le bassin du Lot supérieur et moyen;

-les terrains volcaniques, basaltiques en majorité, sont plutôt perméables. Les eaux de pluie et de fonte des neiges s'y infiltrent assez facilement et vont ressortir au contact du substratum cristallin à la périphérie des massifs (Aubrac, Cantal) en grosses sources à régime régulier;

-enfin, les autres formations (grès et schistes du Primaire; argiles marnes et bancs calcaires du Tertiaire) ont des perméabilités très variables, selon les lieux et selon les saisons (sols plus ou moins saturés). D'une manière schématique, on peut dire que ce sont des terrains imperméables, caractérisés par l'absence de nappes importantes et par une forte aptitude au ruissellement en hiver et au printemps lorsque les sols sont saturés.



(figure n°9)

Le bassin est parcouru par plusieurs failles importantes et bien connues des prospecteurs miniers mais dont l'influence sur l'hydrologie est sinon nulle du moins très



hypothétique et difficile à prouver. C'est ainsi que la faille orientée NNE-SSW ( dite de Villefranche de Rouergue) en prolongement du sillon houiller, coupe la vallée du Lot à quelques kilomètres à l'amont de Capdenac. Les études hydrologiques comparatives entre les débits mesurés à l'amont et à l'aval de cet accident géologique ne permettent pas de conclure de manière significative à des pertes d'eau à cet endroit, compte tenu de l'imprécision intrinsèque des mesures.

### 5.2.3. Les paysages

Le paysage montagnard est en fait très diversifié, en fonction de la nature géologique des terrains notamment. L'altitude y est toujours supérieure à 500 m et dépasse 1000 m sur de grandes superficies. Les pentes moyennes sont très souvent de l'ordre de 30% ou davantage sur le Plomb du Cantal et dans les vallées comme celles de la Truyère qui sont en général de véritables gorges étroites. Par contre, les montagnes situées au coeur du haut bassin, entre Truyère et Lot, ont des pentes beaucoup plus douces : 5 à 15% en moyenne.

Les causses, paysages très classiques occupent toute la bordure Sud du bassin :les surfaces sont presque toujours remarquablement plates (souvent moins de 3%) mais elles sont parcourues par des vallées et bordées de corniches qui sont au contraire très pentues (10 à 30%).

Le tableau n°10 résume l'hypsométrie du bassin.

	Lot	Truyère
200-500 m	9%	5%
500-1000 m	46%	48%
1000-2000 m	45%	47%

(tableau n°10)

Quant à l'hydrographie, on peut simplement signaler que le Lot et la Truyère dessinent un réseau de drainage de forme simple composé de deux branches à peu près symétriques par rapport à un axe EW, celle du Lot au Sud (140 km de longueur environ) et celle de la Truyère au Nord (145 km de longueur environ). D'autre part, les affluents d'importance sont peu nombreux : le Lot reçoit la Colagne en rive droite et la Truyère reçoit le Bès en rive gauche, puis en rive droite la Bromme et le Goul, qui descendent du Cantal.

La forme et la densité du réseau hydrographique sont particulièrement intéressantes à observer. Très dense et très ramifié, en forme de dendrites avec de nombreux coudes et confluent à angle droit sur les terrains cristallins et métamorphiques, le réseau hydrographique devient quasi-inexistant sur les plateaux calcaires des Causses.

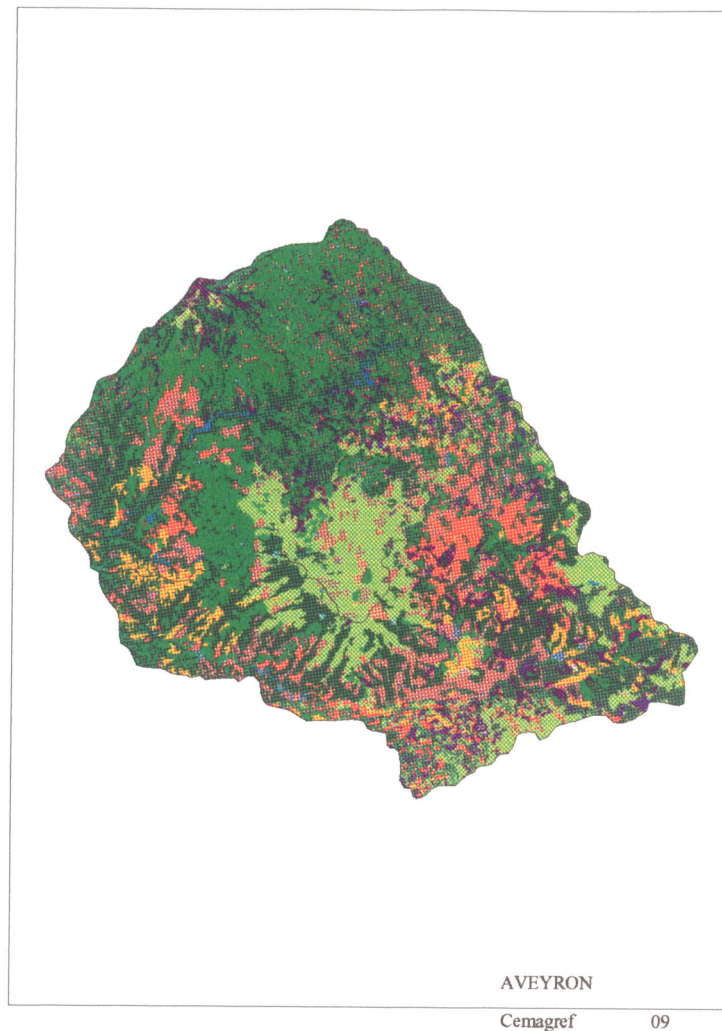
#### 5.2.4. Le couvert végétal

L'étude de la végétation à l'aide de la base de données CORINE LAND COVER (cf. §6.2) laisse apparaître une prédominance des prairies sur le bassin de la Truyère, tandis que le bassin du Lot se compose essentiellement d'une végétation à caractère arboricole (tableau n°11).

	Lot	Truyère
Zones urbanisées	0,57%	0,48%
Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communications	0,03%	0,04%
Décharges et Mines	0,03%	0,07%
Espaces verts artificialisés non agricoles	0,09%	0,03%
Terres arables	7,24%	2,05%
Prairies	8,03%	35,16%
Zones agricoles hétérogènes	20,39%	18,78%
Forêts	38,54%	24,79%
Milieux à végétation arbustives et herbacées	24,08%	16,63%
Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	0,55%	0,32%
Zones humides intérieures	0,21%	0,97%
Eaux continentales	0,24%	0,68%

(tableau n°11)

La figure suivante (n°9) représente le couvert végétal du bassin Aveyron tel qu'on l'extrait de la base CORINE. La légende se trouve en annexe (n°4), avec quelques unes des représentations des autres bassins et avec les tableaux correspondant aux codes de couleurs.



(figure n°9)

Par conséquent, en prenant en compte ce qui a été dit précédemment sur la nature des sols, on peut déjà différencier les deux bassins par leur capacité d'infiltration, de ruissellement et d'évapotranspiration. Le bassin de la Truyère est d'ores et déjà plus accidenté, plus « frais », et plus imperméable que le bassin du Lot, ce qui implique que le ruissellement est important. Ce bassin présente donc un hydrogramme plus pointu que le bassin du Lot.

Pour résumer, le bassin du Lot est constitué de sols bruns lessivés et rendzines rouges, reposant sur des sols essentiellement granitiques et calcaires, peu pentus, et recouverts majoritairement par des forêts, tandis que le bassin de la Truyère, plus accidenté, comporte une part importante de prairies et de forêts sur des sols acides. La géologie est à dominante volcanique et cristalline.

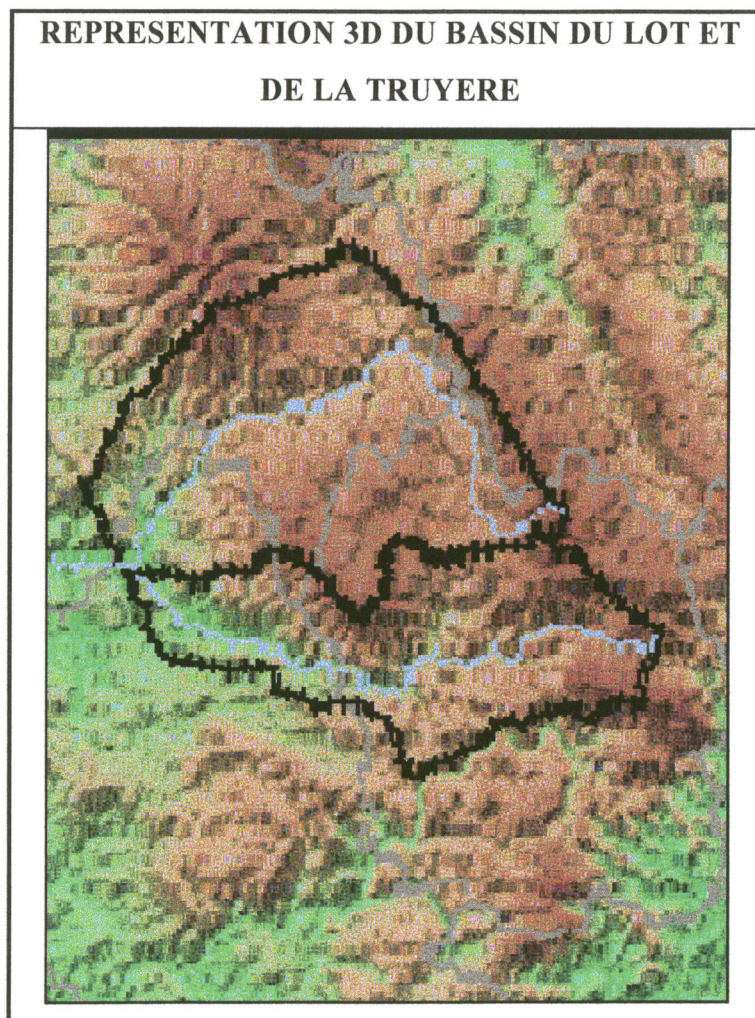
De plus, les apports de ruissellement sur les Causses sont très faibles, le réseau hydrographique étant quasi inexistant sur cette région, et l'infiltration importante. Les surfaces contributrices à l'écoulement sur le bassin du Lot sont donc inférieures à la surface totale. Par



conséquent, on note une prépondérance des apports du bassin de la Truyère sur ceux du haut bassin du Lot.

Ce comportement hydrologique différent justifie donc le découpage de la région en deux zones distinctes.

Dans la suite de l'étude, nous allons faire une étude similaire, moins détaillée toutefois, sur l'ensemble des bassins, et nous allons étudier les différences de géologie, pédologie, couvert végétal, topographie entre les sous bassins.



*(figure n°10)*

## 6. Comparaison des sous-bassins à l'intérieur des bassins

L'écoulement à l'exutoire d'un bassin versant est déterminé premièrement par les conditions climatiques de la région, et deuxièmement par l'aménagement et l'utilisation du territoire. Cependant, deux bassins voisins soumis aux mêmes conditions climatiques peuvent avoir un régime d'écoulement totalement différent. Cette différence est principalement causée par les diverses caractéristiques physiques des deux bassins ( par exemple, le couvert végétal contrôle en partie l'évapotranspiration ). C'est pourquoi, pour chaque bassin, nous allons rechercher les différences et les similitudes que présentent les sous-bassins, au niveau de leurs caractéristiques physiques, du couvert végétal, de la pédologie et de la géologie.

### 6.1. Les caractéristiques physiques des bassins

La littérature hydrologique regorge de paramètres permettant de caractériser un bassin versant. Bien souvent, ces paramètres ne sont pas indépendants les uns des autres, et la connaissance de quelques uns permet de retrouver les autres. Aussi, dans notre cas, nous nous sommes arrêtés à deux paramètres : la densité de drainage et la topographie. Si un bassin a un réseau hydrographique très dense (la densité de drainage  $D_d$  est proche de 1), et une dénivelée importante, l'hydrogramme issu d'un événement pluvieux sera pointu et peu étalé.

#### 6.1.1. La densité de drainage

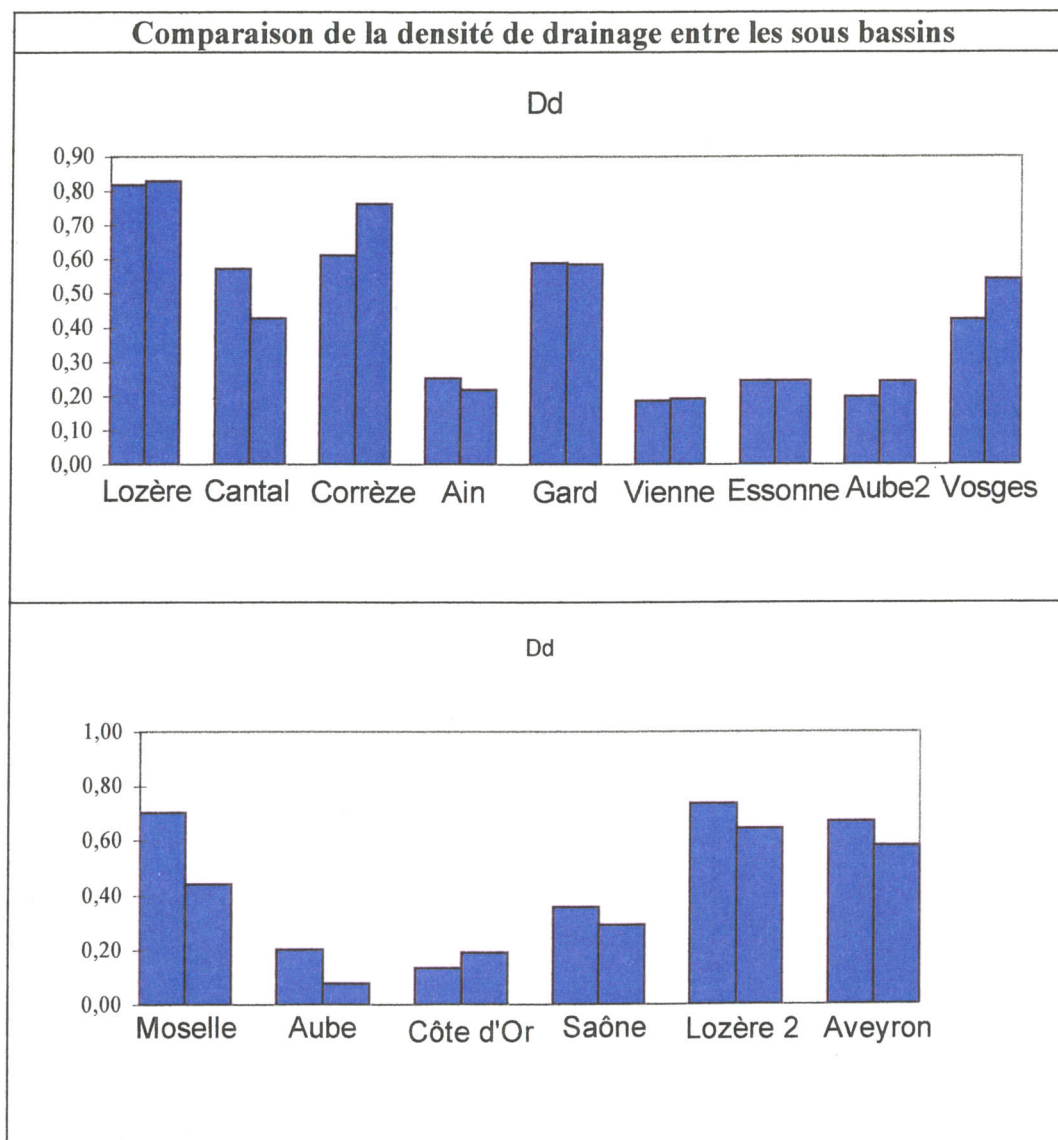
La densité de drainage se définit comme le rapport entre la longueur des canaux d'écoulement et la superficie du bassin.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_k} l_{ij}}{S}$$

où  $l_{ij}$  est la longueur du vecteur  $j$  d'ordre  $i$ .

Une augmentation du nombre de cours d'eau ou de leur longueur par unité de surface diminue le temps moyen de cheminement en réduisant la longueur moyenne de ruissellement à la surface du sol. En général, l'écoulement à la surface du sol est plus lent que dans les canaux.

La comparaison de la densité de drainage est représentée ci-dessous pour chaque sous-bassin, et chaque bassin :



(figure n°11)

Les bassins ESSONNE, GARD, LOZERE et VIENNE sont homogènes du point de vue de la densité de drainage.

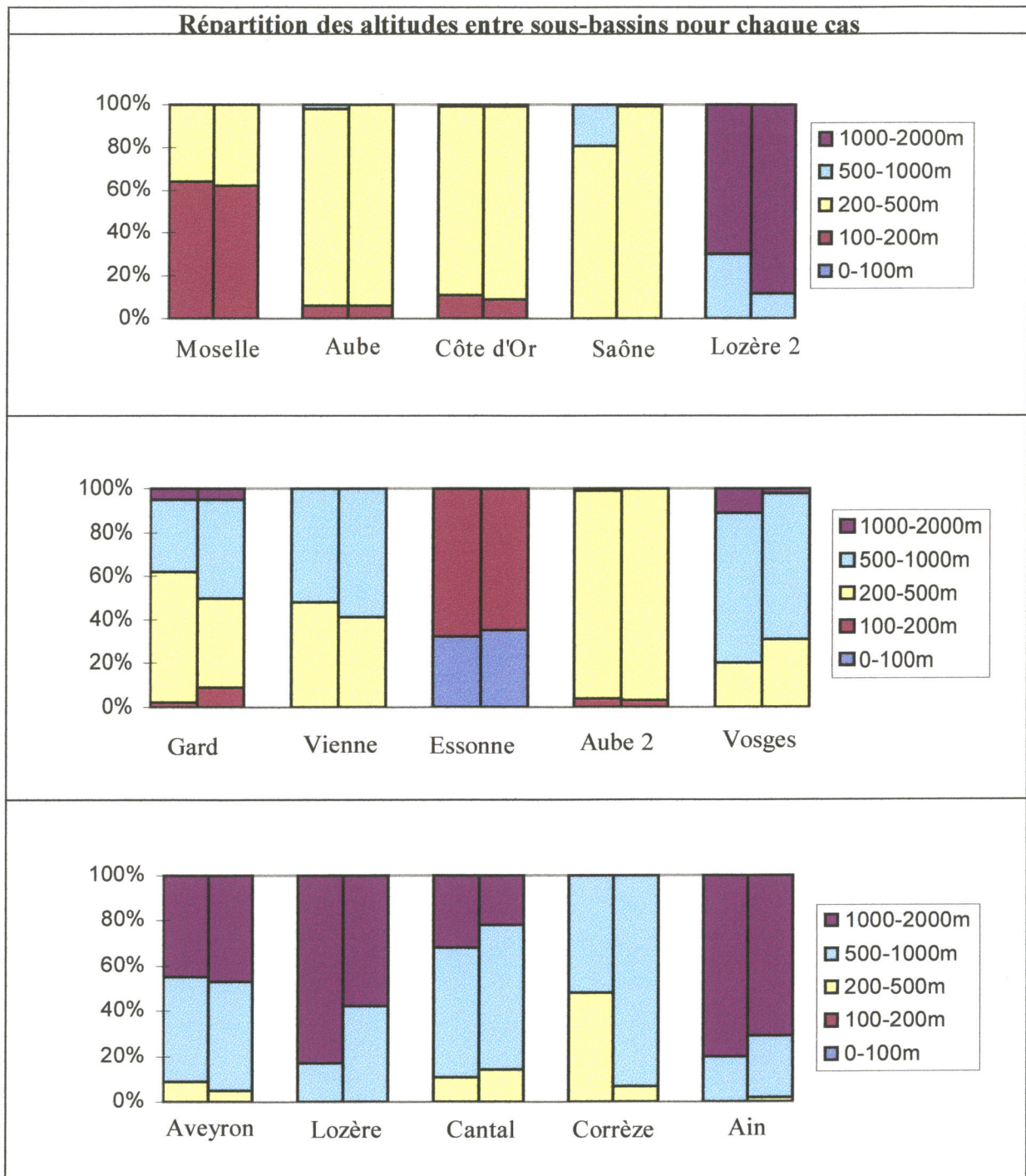
### 6.1.2. La topographie

Les variations d'élévation à l'intérieur d'un bassin ainsi que l'élévation moyenne sont des données essentielles à l'étude des précipitations. En effet, dans la pratique, on constate que la pluie augmente avec l'altitude, jusqu'à une altitude limitée appelée optimum pluviométrique.



De plus, plus un bassin est pentu, plus le temps moyen de cheminement de l'eau diminue et, par conséquent, pour un même volume ruisselé, le débit de pointe est plus fort.

L'hypsométrie de chaque sous-bassin est résumée sur le graphique n°12.



(figure n°12)

Toutes les caractéristiques physiques des bassins sont regroupées en annexe (n°2 et 3)

## **6.2. Le couvert végétal**

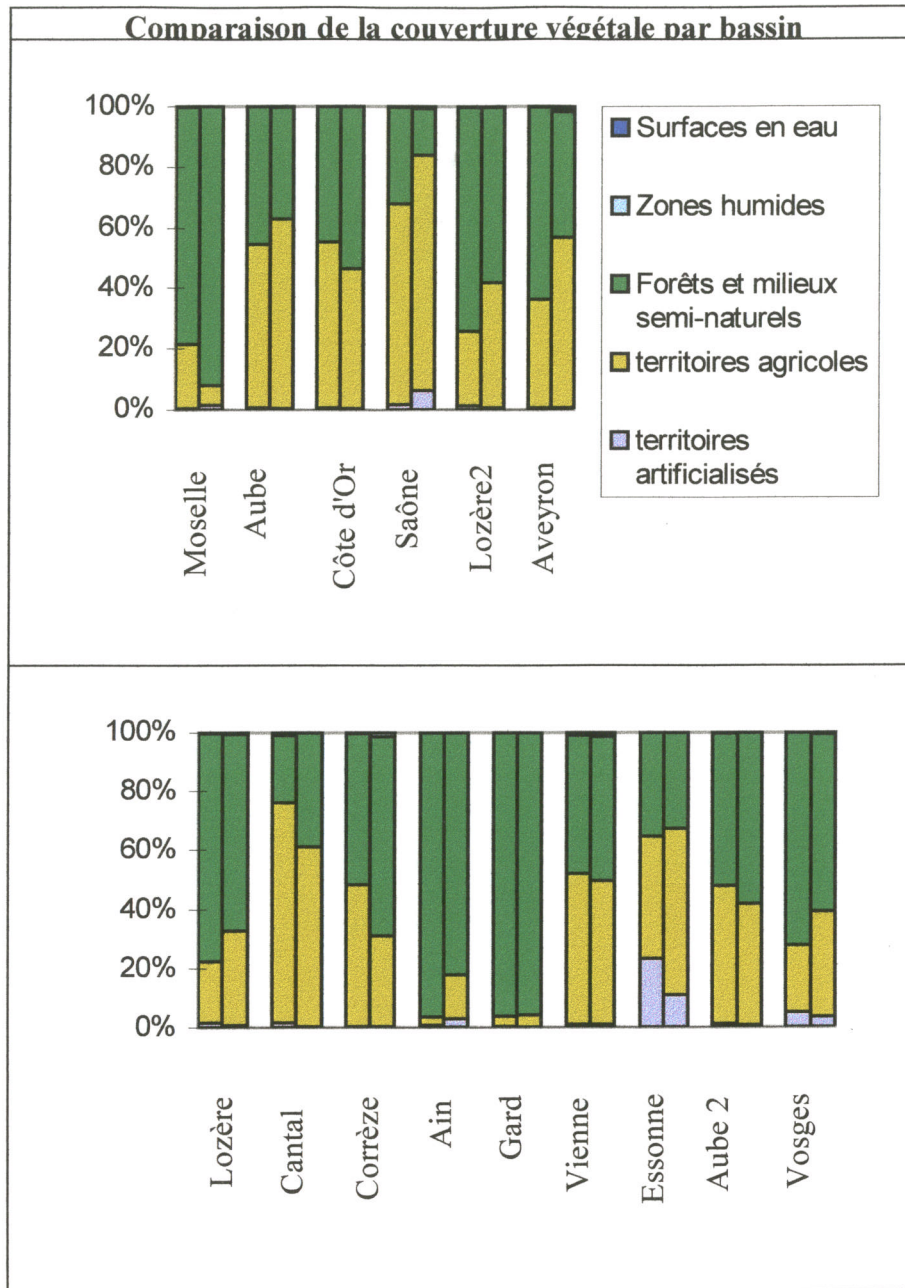
Le couvert végétal influence directement la capacité d'infiltration. En le comparant à un sol nu, il diminue la pluie nette, le volume de ruissellement et le débit de pointe, mais il augmente l'écoulement de base. En offrant une plus grande rugosité à l'écoulement, le couvert végétal retarde le ruissellement et offre une plus grande capacité de stockage par rétention superficielle.

Pour comparer les sous bassins entre eux, nous avons utilisé, après avoir calé et digitalisé les bassins avec le logiciel ArcInfo, la base de données CORINE LAND COVER pour obtenir la couverture végétale de ces bassins. Cette base est un ensemble de polygones caractérisants des unités spatiales qui correspondent soit à une zone dont la couverture peut être considérée comme homogène, soit à une combinaison de zones élémentaires qui représentent des structures d'occupation pouvant être envisagées comme constituant une même classe d'occupation du sol. CORINE LAND COVER, en France, a été réalisée à partir d'images radar SPOT multispectrales et orthorectifiées à l'aide d'une base de données altimétriques de l'Institut Géographique National.

La nomenclature, divisée en trois niveaux hiérarchiques, de la base CORINE est présentée en annexe, avec quelques exemples de couvertures des bassins étudiés. Dans notre cas, nous nous sommes limité au premier niveau qui distingue :

1. les territoires artificialisés,
2. les territoires agricoles,
3. les forêts et milieux semi-naturels,
4. les zones humides,
5. les surfaces en eau.

Le tableau en annexe (n°4) résume, pour chaque sous-bassin, les surfaces occupées par chaque niveau. Les résultats graphiques sont sur le graphique n°13 page suivante.



(figure n°13)

### 6.3. La pédologie et la géologie

Sol et sous-sol étant fortement liés, dans cette partie, nous traiterons les deux en même temps. De plus, contrairement aux caractéristiques déjà traitées, dans le cas présent, chaque bassin possède ses propres caractéristiques, sans lien avec les autres bassins. On ne pourra donc représenter que les différences entre les sous bassins d'une même unité. Pour cette raison, nous allons étudier la pédologie et la géologie au cas par cas.

➤CANTAL : Les deux sous bassins sont entièrement constitués de roches volcano-sédimentaires. Quant à la nature du sol, elle distingue les rankers pseudo-alpins, les sols bruns acides, les sols bruns lessivés et bruns acides, et les sols ocres podzoliques et bruns acides. La répartition surfacique est la suivante :

	Pont de Vendes 1	Pont de Vendes 2
Basaltes	36%	45%
Trachytes, Andésites	64%	55%
Rankers pseudo-alpins	3%	25%
Sols bruns acides	42%	48%
Sols bruns lessivés et bruns acides	36%	27%
Sols ocres podzoliques et bruns acides	19%	0%

(tableau n°12)

➤MOSELLE : La géologie est à 100% du grès du Trias, dans les deux cas. La pédologie se scinde en deux catégories , d'un coté des sols bruns eutrophes, et de l'autre, des sols ocres podzoliques, dans les mêmes proportions pour les deux sous bassins.

	Laneuveville	Vasperviller
Grès du Trias	100%	100%
Sols bruns eutrophes	48%	46%
Sols ocres podzoliques	52%	54%

(tableau n°13)

➤AIN : les deux entités sont analogues au niveau constitution de la roche : sédimentaire. De plus, on remarque que la Sémine coule perpendiculairement aux structures géologiques, tandis que la Valserine coule parallèlement à ces structures.

	Coz	Chézery
Marnes	12%	24%
Calcaire	88%	76%
Sol humique carbonaté	100%	100%

(tableau n°14)

➤ESSONNE : Ici, on est en présence d'une couverture limoneuse décarbonatée, de plusieurs mètres d'épaisseur, dans une zone de grandes cultures céréalières. Ce



sont des sols bruns lessivés dont seul l'horizon de surface régule l'hydrologie, par rétention d'eau. Par endroits, cette couverture est incisée, et on a de l'argile et des sables. L'horizon de profondeur Bg est relativement imperméable. La géologie est à 100% oligocène.

	Villebon	Le Breuil
Limons	100%	89.6%
Argiles et sables	0%	10.4%
Sols bruns lessivés	100%	100%

(tableau n°15)

AUBE, AUBE 2, COTE D'OR : les trois bassins se trouvent dans la même région, formée de plateaux et de petites zones pentues inter plateaux. Dans les trois cas, on a une forte relation roches-sols, avec des sols calcaires sur les roches calcaires et des sols bruns sur les marnes. La géologie est décrite de l'amont vers l'aval.

	AUBE		AUBE 2		COTE D'OR	
	Plaines	Molesmes	O-Aube	Rennepont	Polisy	Celles/O.
Calcaires	82.8%	71.3%	69.4%	57%	65.7%	48.1%
Marnes	5.8%	8.8%	8.3%	14.3%	6.3%	12.2%
Calcaires marneux	11.4%	19.9%	22.3%	28.7%	28%	39.7%
Sols calcaires	94.2%	91.2%	91.7%	85.7%	93.7%	87.8%
Sols bruns	5.8%	8.8%	8.3%	14.3%	6.3%	12.2%

(tableau n°16)

➤CORREZE, VIENNE : Ces deux bassins présentent la même composition géologique. Ils sont tous deux formés de granite, granulite, micaschiste et gneiss. Ils sont en outre composés principalement de sols bruns acides.

	Corrèze		Vienne	
	Corrèze	Moulin du Bos	St-Priest V	St-Priest T
Granite	0	8.1%	7.9%	14.3%
Granulite	100%	45.8%	58.1%	48.8%
Micaschiste et gneiss	0%	46.1%	34%	36.9%
Sols ocres podzoliques, bruns acides	92%	56%	49%	3%
Sols bruns acides	0%	3%	11%	28%
Sols bruns lessivés	0%	0%	2%	10%
Sols bruns lessivés, bruns acides	8%	41%	38%	59%

(tableau n°17)

➤GARD : Ce bassin est composé de granite, micaschistes ( essentiellement phyllades et cornéennes) en amont, et de calcaires et marnes (surtout Jurassique inférieur et moyen) en aval. Le sol est essentiellement formé de sols bruns acides et lithosols dominants.

	Corbes	Roucan
Granite	31.4%	4.5%
Micaschistes	50.5%	87.5%
Calcaires et marnes	18.1%	8%
Sols bruns acides	100%	100%

(tableau n°18)

➤VOSGES : Ce bassin a un relief assez prononcé, et de forts changements bioclimatiques, fonction du relief. Le milieu est donc assez complexe, et à la concordance roche-sol se surimpose l'effet bioclimat. D'amont en aval, on passe de granite à des gneiss et à des grès du Trias.

	Noir Gueux	Jarmenil
Granite	95.7%	26.7%
Gneiss	3.7%	63.5%
Grès	0.6%	9.8%
Sols alluviaux	4.4%	0.2%
Sols bruns acides	0%	32.9%
Sols bruns acides et bruns ocreux	56.5%	37.2%
Sols bruns ocreux et ocres podzoliques	36.2%	29%
Sols bruns ocres podzoliques humifères	1.6%	0%
Sols podzoliques	1.3%	0.7%

(tableau n°19)

➤ LOZERE, LOZERE 2 : le milieu est assez complexe, composé de roches cristallines et de roches sédimentaires du Jurassique.

	LOZERE		LOZERE 2	
	Les Fonts	Mende	Le Monastier	Bramonas
Calcaires	42,5%	43,1%	20,1%	34,1%
Micaschistes et gneiss	0%	0%	18,8%	4,6%
Granulites	42,5%	31,6%	61,1%	39,6%
Lignites	15%	25,3%	0%	22,1%
Sols ocres podzoliques, bruns acides	56%	46%	50%	43%
Rankers pseudo-alpins, rankers à mor	5%	16%	22%	11%
Sols bruns calcaires, rendzines rouges	22%	35%	20%	31%
Sols bruns lessivés, rendzines rouges et lithosols	15%	3%	0%	14%
Sols bruns acides et lithosols	0%	0%	4%	0%
Sols de tourbières	2%	0%	4%	1%

(tableau n°20)

➤ SAONE : Ce bassin est, d'un point de vue géologique, extrêmement complexe, avec de nombreux recoupement des différentes formations présentes.

	Rigny	Vitry en Ch.
Schistes bitumineux	20,8%	29,5%
Schistes et Gneiss	0%	18,7%
Schistes gréseux et houille	16,6%	9,8%
Calcaires	3,7%	8,9%
Marnes	0%	14%
Grès	29,2%	4,3%
Granulites	27,4%	14,8%
Lignites	2,3%	0%
Sols bruns eutrophes	23%	27%
Sols bruns acides et lithosols	76%	70%
Sols podzoliques	1%	3%

(tableau n°21)

➤ AVEYRON : ce bassin est expliqué en détail dans le chapitre précédent.

## 6.4. La méthode de comparaison

### 6.4.1. Protocole de comparaison

Après avoir collecté les données précédentes, il faut établir un protocole de comparaison pour déterminer l'homogénéité ou l'hétérogénéité d'un bassin vis à vis de ses deux sous-bassins.

Désormais, chaque bassin est représenté par une matrice à 2 colonnes, correspondant aux deux sous-bassins, et 3 blocs de données :

1. dans le premier bloc, la pédologie et la géologie, ce qui apporte deux informations sur les bassins;
2. dans le deuxième bloc, le couvert végétal, qui apporte une information supplémentaire;
3. dans le troisième bloc, la topographie et la densité de drainage, ce qui apporte deux nouvelles informations.

Si les deux sous-bassins sont homogènes l'un par rapport à l'autre, les deux vecteurs appartenant à un bloc de la matrice sont proches et présentent une forte corrélation. Par conséquent, nous pouvons mesurer la distance séparant ces deux blocs.

De Coursey (1973) a mesuré les similitudes entre plusieurs groupes de bassins versants par la distance euclidienne :

$$d_{j,k} = \left[ \sum_{i=1}^p (x_{i,j} - x_{i,k})^2 \right]^{1/2}$$

où  $d_{j,k}$  représente la distance entre les stations  $j$  et  $k$ ,  $x_{i,j}$  est la  $i^{\text{ème}}$  caractéristique de la station  $j$  et  $p$  est le nombre total de caractéristiques. Les plus grandes similitudes sont ainsi liées aux plus petites distances.

Par exemple, pour calculer la distance entre les deux sous-bassins de l'unité CANTAL, pour le domaine pédologie-géologie :

$$d_{\text{pédo-géol}} = \left[ \sum_{i=1}^p (x_{i,1} - x_{i,2})^2 \right]^{1/2}$$

où les  $x_i$  sont les valeurs attribuées en % de la surface aux formations pédologiques et géologiques présentes sur le bassin, (tableau n° 12).

Le calcul donne :

$$\begin{aligned} d^2 &= (0.36 - 0.45)^2 + (0.64 - 0.55)^2 + (0.03 - 0.25)^2 + (0.42 - 0.48)^2 + (0.36 - 0.27)^2 + (0.19 - 0)^2 \\ &= 0.1124 \end{aligned}$$

A l'intérieur de chaque bloc, nous pouvons comme ci-dessus calculer une distance pour tous les bassins versants, puis, en affectant un poids à chacune de ces distances, nous calculerons un critère d'homogénéité pour chaque bassin.

Comme les blocs des vecteurs doivent avoir chacun le même poids dans un souci d'homogénéité, nous affectons un poids double pour le couvert végétal (une seule information) par rapport aux deux autres blocs qui sont la géologie et la pédologie, et la topographie et le réseau hydrographique (deux informations chacun). Ainsi, le critère d'homogénéité sera une pondération des distances calculées pour chaque domaine :

$$d_{1,2} = \sqrt{0.5 \times d_{\text{pedo+geol}}^2 + d_{\text{vegetal}}^2 + 0.5 \times d_{\text{topo+hydro}}^2}$$

### 6.4.2. Analyse des résultats

Hormis la densité de drainage, toutes les caractéristiques sont exprimées en pourcentage de la surface.

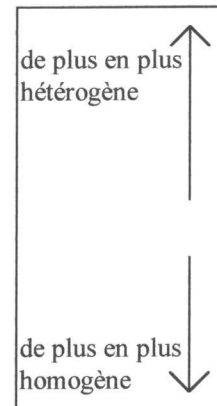
Les résultats des distances entre les sous-bassins pour chaque domaine étudié et pour chaque bassin versant sont regroupés dans le tableau suivant (n°22). Nous pouvons remarquer dans ce tableau que l'amplitude des intervalles des distances pour chaque domaine est variable. Il est de 0,3 pour la végétation, 0,6 pour la topographie associée à la densité de drainage, et de 1 pour la géologie et la pédologie. Par conséquent, avec les poids que l'on applique, les amplitudes des intervalles deviennent du même ordre de grandeur.

	végétation	pédo+géol	topo+Dd
MOSELLE	0,201	0,028	0,180
AUBE	0,128	0,152	0,128
COTE D'OR	0,125	0,235	0,064
SAONE	0,206	0,392	0,263
LOZERE2	0,229	0,431	0,270
AVEYRON	0,296	0,568	0,102
LOZERE	0,157	0,276	0,354
CANTAL	0,211	0,335	0,192
CORREZE	0,236	0,867	0,599
AIN	0,190	0,170	0,121
GARD	0,007	0,468	0,235
VIENNE	0,029	0,552	0,099
ESSONNE	0,197	0,147	0,042
AUBE 2	0,084	0,174	0,052
VOSGES	0,178	0,997	0,187

(tableau n°22)

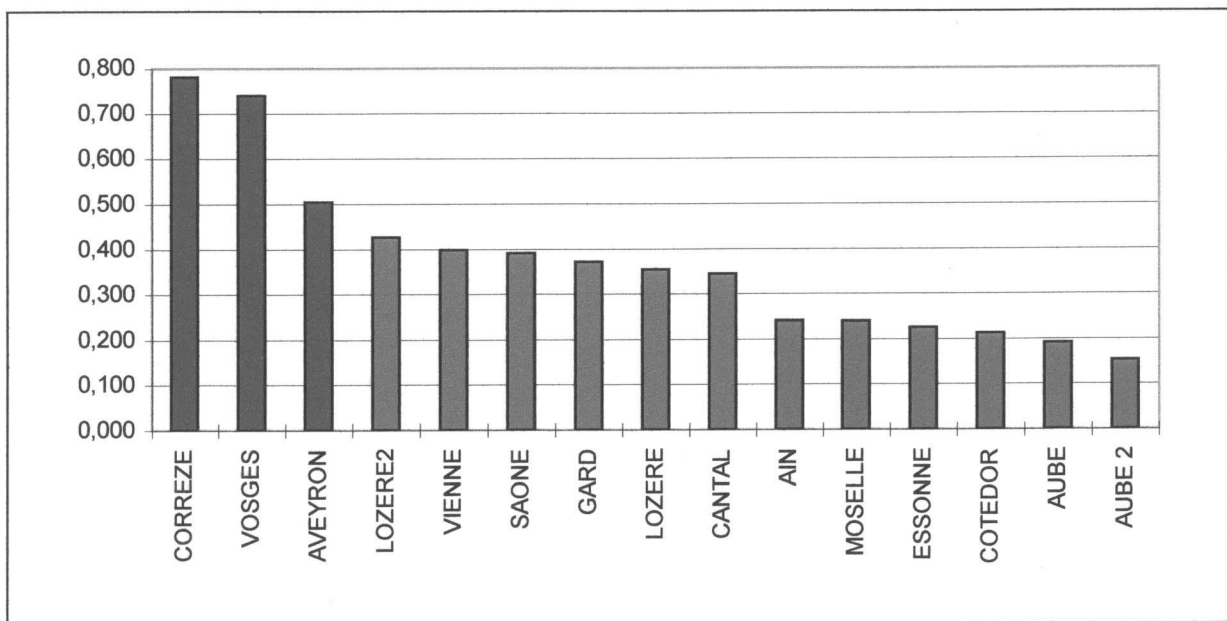
Le critère mesurant l'homogénéité totale à l'intérieur des bassins versants, calculé grâce à la formule précédente ( $d_{1,2} = \sqrt{0.5 \times d_{pedo+geol}^2 + d_{vegetal}^2 + 0.5 \times d_{topo+hydro}^2}$ ), est donné dans le tableau ci après (n°23). Nous considérons l'hypothèse que plus ce critère est faible, plus les caractéristiques entre les sous-bassins sont semblables, et plus le bassin est homogène. Et inversement.

CORREZE	0,782
VOSGES	0,739
AVEYRON	0,504
LOZERE2	0,426
VIENNE	0,398
SAONE	0,392
GARD	0,371
LOZERE	0,354
CANTAL	0,345
AIN	0,240
MOSELLE	0,239
ESSONNE	0,225
COTE D'OR	0,213
AUBE	0,190
AUBE 2	0,153



(tableau n°23)

Si l'on représente l'histogramme du critère d'homogénéité pour chaque bassin, comme le montre la figure n°15, nous pouvons regrouper les bassins en trois groupes : les bassins les plus hétérogènes, les bassins les plus homogènes, et les « entre-deux ».



(figure n°15)



### 6.4.4. Comparaison avec les résultats de la modélisation

Pour mémoire, les différents résultats trouvés sont :

T1 de Wilcoxon

SAONE	-1,408
GARD	-1,281
VIENNE	-0,948
AVEYRON	-0,837
VOSGES	-0,802
ESSONNE	-0,693
CANTAL	-0,480
COTE D'OR	-0,081
AUBE	0,054
CORREZE	0,059
LOZERE2	1,177
LOZERE	1,209
AIN	2,381
AUBE 2	2,543
MOSELLE	5,275

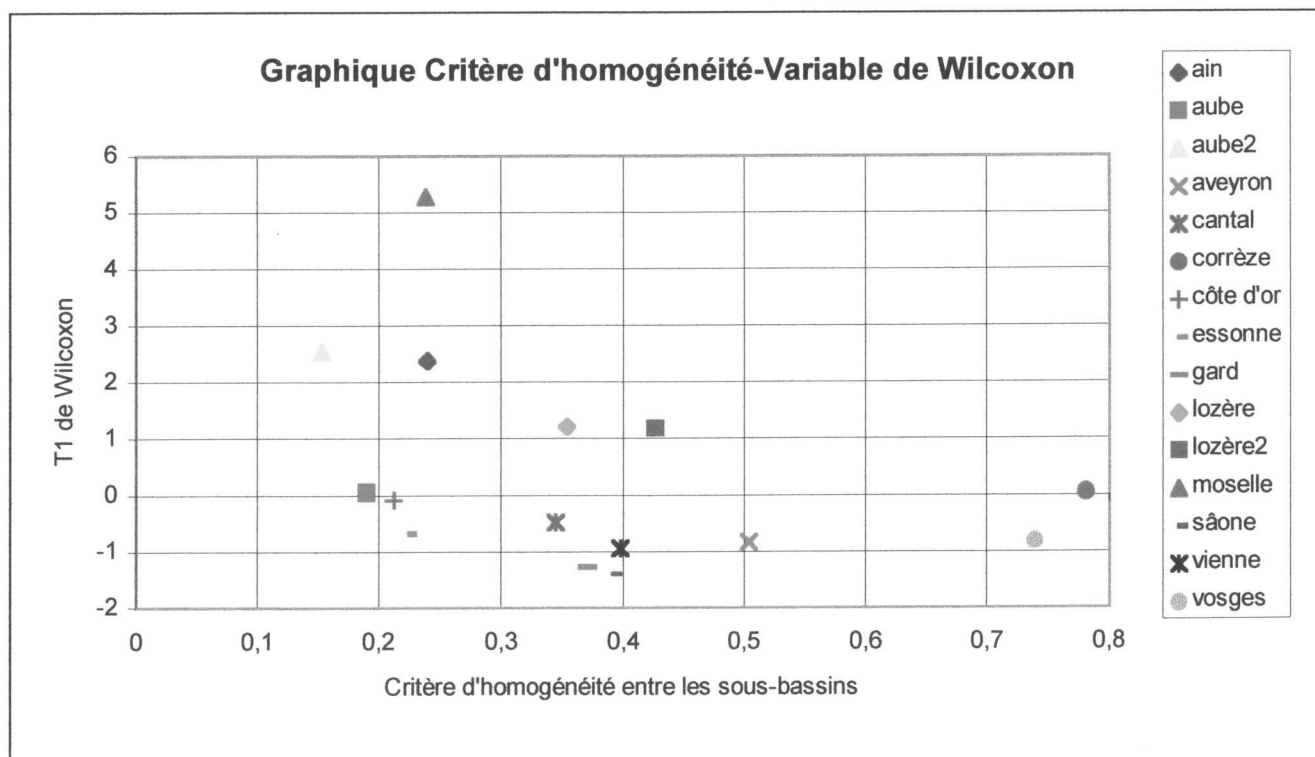
Critère d'hétérogénéité

CORREZE	0,782
VOSGES	0,739
AVEYRON	0,504
LOZERE2	0,426
VIENNE	0,398
SAONE	0,392
GARD	0,371
LOZERE	0,354
CANTAL	0,345
AIN	0,240
MOSELLE	0,239
ESSONNE	0,225
COTE D'OR	0,213
AUBE	0,190
AUBE 2	0,153

de plus en plus  
hétérogène

de plus en plus  
homogène

Si on place en abscisse les valeurs du critère d'homogénéité, et en ordonnée celles de la variable de Wilcoxon pour chaque bassin, la représentation graphique de ces deux classifications engendre le nuage de points suivant (figure n°16):



(figure n°16)

Entre les deux tableaux, on ne retrouve pas le même classement, ce que l'on observe parfaitement sur le graphique n°16 : aucune corrélation n'est possible avec ce nuage de points.

Il n'est par conséquent pas possible, dans l'état actuel des choses de mettre en évidence un lien entre les variables explicatives retenues et les résultats de la modélisation, avec le jeu de données dont nous disposons.

Que nous apporte cette conclusion ?

L'absence de lien direct entre la quantification de l'hétérogénéité entre deux mailles et l'amélioration de la qualité de la modélisation en agglomérant les flux à la sortie de ces mailles par rapport à une modélisation globale montre qu'il ne suffit pas de tenir compte de toutes les hétérogénéités, avec la précision la plus fine possible, pour coller à la réalité.

Or, comme le souligne K. BEVEN, (1989), la puissance de calcul n'est plus une contrainte au degré de découpage du bassin versant. En effet, « des programmes seront bientôt disponibles aux ingénieurs d'étude de telle sorte que les modèles [maillés] pourront être utilisés dans une large gamme d'applications. Il y a un grand danger que la rigueur théorique qui sous-tend ces modèles engendre une foi sans réserve dans leurs prédictions ». Ainsi, on pourra faire un maillage de plus en plus fin pour tenir compte de toutes les hétérogénéités relevées sur le terrain, les mettre en équations plus ou moins réalistes, la machine donnera toujours un résultat numérique. L'hypothèse de travail est, ici, qu'à l'intérieur de chaque maille, le bassin fonctionne indépendamment du reste, et que l'agglomération des flux en sortie de maille est réaliste parce qu'on a été le plus précis possible. Mais, que connaît-on des interactions entre les mailles, aussi différentes soient elles ? En ce qui nous concerne, le fait qu'il n'y ait pas de lien direct et immédiat entre l'observation des différences de caractéristiques physiographiques entre deux sous-bassins à l'intérieur d'un bassin versant et les différences de fonctionnement hydrologique entre ces deux entités replace le problème dans son contexte et on peut ainsi s'apercevoir que beaucoup de connaissances sont encore à acquérir avant de maîtriser le fonctionnement intime d'un bassin versant.

## CONCLUSION

L'objectif visé par cette recherche était d'abord de comparer deux approches de modélisation, globale et semi-distribuée, de la relation pluie-débit afin d'évaluer la prépondérance éventuelle de l'une sur l'autre.

La méthode adoptée a consisté à utiliser des données de bassins versants présentant la particularité de réunir deux stations de jaugeage à l'amont et une station à l'aval d'une confluence, formant ainsi des triplets. Nous avons ensuite utilisé un même modèle pour comparer les débits calculés à la station aval avec une combinaison des débits calculés aux stations amonts aux débits observés en aval. Il ne s'agissait donc pas de mettre en compétition deux modèles distincts, mais plutôt d'évaluer l'effet d'un maillage, aussi sommaire soit il.

En travaillant sur le maximum de triplets possible, soit quinze au total, et sur des périodes suffisamment longues, l'étude statistique des critères de Nash, avec l'utilisation du test non paramétrique de Wilcoxon, n'a pas permis de mettre en évidence une différence significative entre les deux approches. Certes, l'échantillon de base est assez réduit. Néanmoins, il représente la quasi totalité des bassins versants français présentant la particularité de réunir trois stations de jaugeage à proximité d'une confluence. Pour aller plus avant, il faudra désormais se tourner vers les pays limitrophes pour rechercher des conditions similaires, en gardant un esprit critique vis à vis des données qui doivent rester homogènes quelle que soit leur origine. Par exemple, le relevé pluviométrique du jour  $j$  correspond-t-il à la pluie du jour  $j$  ou à celle du jour  $j-1$  ? Cela sera d'autant plus important pour les bassins frontaliers où on pourra utiliser des données de plusieurs pays.

Ensuite, nous avons voulu voir s'il y avait une correspondance entre l'hétérogénéité caractérisant les deux sous-bassins d'un même triplet et les différences de résultats apparaissant entre les deux approches. Pour cela, nous avons élaboré une méthode de comparaison basée sur une combinaison des distances euclidiennes entre les éléments caractéristiques de chaque sous-bassin à l'intérieur de plusieurs domaines d'étude : pédologie, géologie, couvert végétal, topographie et densité de drainage. Bien que nous nous soyons attachés à être rigoureux et précis dans la collecte des données physiographiques, pour chacun de ces domaines, notre méthode de comparaison, qui a constitué à établir un parallèle entre un classement des bassins selon leurs différences et un autre selon le degré de supériorité de l'approche distribuée par rapport à l'approche globale, n'a pas abouti à mettre en évidence un lien direct entre « hétérogénéité apparente du bassin versant » et « nécessité de découper le bassin en sous-unités ».

Ce résultat ne cherche en aucun cas à affirmer que les caractéristiques physiques n'influencent pas la réponse d'un bassin versant à une pluie, mais que leur choix est plus complexe que celui fait au cours de cette étude. Et pourtant, pour caractériser le couvert végétal, nous avons utilisé un nouvel outil qu'est la base de données CORINE LAND COVER. Cette base de données très récente n'a encore été que trop peu utilisée dans l'étude des couvertures végétales. L'aide offerte est très appréciable dans la mesure où on peut désormais considérer de grandes superficies sans avoir à extrapoler des observations ponctuelles pour décrire la végétation.

Enfin, l'intitulé général de l'étude, à savoir « Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau », s'intègre au sein de l'équipe de recherche dans un projet plus général, AIMWATER, (Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources), dont ce travail n'est que le premier maillon. L'objectif est d'améliorer les modèles en intégrant l'état d'humidité du sol et en faisant intervenir la télédétection. Par conséquent, les conclusions tirées de ce travail sont une base à l'établissement de méthodes transposables d'un site à un autre. Les déterminants hydrologiques régionaux sont soit une imbrication plus fine et plus complexe des caractéristiques que nous avons étudiés, soit des variables appartenant à d'autres domaines encore inexplorés.

## BIBLIOGRAPHIE

- ABBOTT, M. B., REFSGAARD, J. C.**, 1996. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers.
- AKAIKE**, 1973. Information theory and an extension of maximum likelihood principle. Second International Symposium on Information Theory, Budapest, Akademia Kiado, pp 267-281
- ANDREWS, D. F.**, 1972. Plots of high dimensional data. Biometrics, 28, pp 125-136.
- BEVEN, K.**, 1989. Changing ideas in hydrology-the case of physically based models. Journal of hydrology, n°105, pp 157-172.
- BOBEE, B.**, 1996. Eléments de statistiques. Cours de DEA à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- BOCQUILLON, C.**, 1980. Les petits ruisseaux font les grandes rivières. Rapport du Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation, Université de Montpellier II, France.
- DeCOURSEY, D. G.**, 1973. Objective regionalization of peak flow rates. Water resources publications, pp 395-405.
- DODGE, Y.**, 1993. Statistique, Dictionnaire encyclopédique. Dunod, Paris. 408 p.
- DUCHAUFOR, Ph.**, 1983. Pédologie : pédogenèse et classification, 2ème édition. Masson, Paris.
- EDIJATNO**, 1987. Amélioration des modèles simples de transformations pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- EDIJATNO**, 1991. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie débit au pas de temps journalier. Rapport de thèse, 242+635 p. Université Louis Pasteur, Stasbourg.
- EDIJATNO, MICHEL, C.**, 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2, pp 113-121.
- FLETCHER, R., POWELL, M.J.D.**, 1964. A rapidly convergent method for minimization. Computer Journal, n°6, pp 163-169.
- GIBBONS, J.D.**, 1971. Nonparametric Statistical Inference. McGraw-Hill, Kogakusha, Tokyo.
- LEVIANDIER, T.**, 1995. Invariance d'échelle et régionalisation en hydrologie. Groupe analyse des données CEMAGREF.
- LLAMAS, J.**, 1993. Hydrologie générale, principes et applications, deuxième édition. Gaëtan Morin éditeur, 527 p.

- MAHALANOBIS, P. C.**, 1936. On the generalized distance in statistics. Proceedings of the National Institute Sci. India, n°12, pp 49-55.
- MAILHOL, J. C.**, 1979. Régression sur composantes principales en vue de prévision. Note interne, CTGREF Division HHAN.
- MAKHLOUF, Z.**, 1991. Signification hydrologique des paramètres d'un modèle conceptuel pluie-débit. Mémoire de DEA, Université Paris-Sud.
- MAKHLOUF, Z.**, 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, 426+208 p. Université Paris XI Orsay.
- MANDELBROT, B. B.**, 1982. The fractal geometry of Nature. W. H. Freeman & Co, San Francisco, USA.
- MARSILY, G. de**, 1994. Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie, Tribune libre. Revue des Sciences de l'Eau, n°7, pp 219-234.
- MARTINEC, J. , RANGO, A.**, 1989. Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models. Water Resources Bull. USA, n°25, pp 421-432.
- MICHEL, C.**, 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle à un paramètre? La Houille Blanche, n°1, pp 39-44.
- MICHEL, C.**, 1989. Modèle pluie-débit de prévision d'étiages en valeurs mensuelles. Cemagref, Antony.
- MICHEL, C.**, 1991. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Cemagref Antony.
- MICHEL, C., EDIJATNO, LEVIANDIER, T.** Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. Sciences Hydrologiques, pp 219-222.
- MOSLEY, M. P.**, 1981. Delimitation of New Zealand Hydrologic Regions. Journal of Hydrology, n°49, pp 173-192.
- MOTTET, G.**, 1993. Géographie physique de la France. Presses universitaires de France
- MOUSSA, R., BOCQUILLON, C.**, 1993. Morphologie fractale du réseau hydrographique. Hydrological sciences journal, n°3, pp 187-201.
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V.**, 1970. River flow forecasting through conceptual models. J. Hydrol., n°10, pp 282-290.
- NATHAN, R. J., Mc MAHON, T. A.**, 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. Journal of Hydrology, n°1-4, pp 217-238.
- PALAGOS, B.**, 1997. Quelques estimateurs de l'erreur de prédiction. Document interne provisoire, CEMAGREF.

- RAO, C. R.**, 1965. Linear statistical inference and its applications. John Wiley & Sons, New York.
- ROCHE, M.**, 1986. Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Masson, Paris.
- ROSENBROOK, H. H.**, 1960. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. The Computer Journal, n°3, pp 175-184.
- TASKER, G. D.**, 1982. Comparing methods of hydrologic regionalization. Water Resources Bull., n°18, pp 965-970.
- W.M.O.**, World Meteorological Organization. Simulated Real-Time Intercomparison of Hydrological Models
- WACKERNAGEL, H.**, 1993. Cours de géostatistique multivariable, 4<sup>ème</sup> édition. Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris.
- WILCOXON, F.**, 1945. Individual comparisons by ranking methods. Biometrics, n°1, pp 80-83.





# ANNEXES

## Annexe n°1 : résultats de la modélisation.

Comparaison des critères de Nash avec 0 paramètre de calage pour le BV intermédiaire

AUBE	CANTAL		GARD		CORREZE		VIENNE		COTE D'OR		LOZERE		AVEYRON		AIN		LOZERE 2		SAONE		MOSELLE		ESSONNE		AUBE 2		VOSGES			
	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr		
83,2	85,2	86,6	88,1	83,8	86,8	93,9	93,8	89,4	90	94,5	93,8	76,9	74,7	63,1	61,1	69,7	66	79,6	80,1	92,2	92,4	59,1	-0,9	64,4	70,4	93,2	91,5	91	90,6	
92,3	88,7	84	85	75,3	84,3	92	91,9	90,1	90,4	90,6	90,7	85,2	83,6	62,9	68,7	51,3	51,7	86,1	83,4	94,4	94,3	76,8	-9,6	57,9	75,9	92,7	91,1	90,3	91,1	
91,4	90,6	78,8	82	90,2	92,3	84,8	85	88,6	89,2	93,8	93,5	87,3	87,3	52,2	67,9	47,7	46,3	87,5	86,4	92,7	93,7	82,9	11,3	65,6	65,2	93,6	92,2	82,3	83,6	
92,7	92,2	84,3	85,4	82,7	84,6	91,9	92,1	89	89,4	84,1	85,4	87,4	83,7	79,8	69,5	69,1	65,8	88,7	86,9	94,1	94,1	87,7	66,4	63,2	18	91,9	91,8	90,2	90,6	
84,8	85,7	83	83,3	89,9	91,2	91,3	92,4	91,4	90,3	91,2	91,7	83,6	79,3	64,8	65,2	70,9	66,7	86,8	86,4	93	93,1	78,8	0,2	73,8	61,8	93,1	92,5	82,2	84,7	
91,7	90,5	89,3	89,1	86,1	87,2	91,9	89,9	89,9	89,2	89,5	89,7	86,1	83,8	52,7	64,8	51,6	51,3	86,9	82,8	94,2	94,2	72	-36	70,8	26,9	93,8	92,1	91,2	92,1	
89,1	89,9					92,4	91,9	88,5	87	93,9	93,2	87,9	88,3	75,7	73,6	48,9	49	86,2	87,4	91,7	92,8	63	-21	31,2	57,4	93,7	91,9			
87,8	89					87	86,9	88,6	87,4	83	85,1	76,8	76,8	59,9	58,4	69	67,3	88,2	85,4	94,1	94,1	85,9	46,5	33,6	67,1	95	94,5			
87,1	87,7					94,3	94,8	91,8	91,3	93,4	92,9	85	87	63,7	69,1	70,1	61,3	86,7	87,4	93,2	93,5	84,8	15,7	35,8	56,6	94	92,2			
89,5	88,7					91,9	93	90	90,4	94,8	95,6	71,9	75,3	74,3	72,4	69,9	63	81,9	78,5	92,5	92,3	68,6	-19	54,6	60,6	93,6	92,1			
91,5	91,6					91,9	92,3	89,3	89,2	93,9	93,8	78,2	83,5	56,8	56,5	51,7	44,2	86,5	86,8	91,9	92,9	78,7	12,6	63,8	66,9	94,7	94			
91,5	91,5					94,2	93,6	89	88,8	83,9	85,9	86	88,1	68,4	68,8	70	62	89,2	87,1	94	94,3	90,4	58,4	52,3	71,8	93	92,6			
87,8	88,9					87,5	86,7	91,3	91,6	92,1	91,9	87,9	88,3			68,3	65,4	87,5	87,4	92	93	85,7	4,3							
86	88,2					93,6	93,5	89	89,4	95,1	96,1	76,8	76,8			68,6	66,7	80,9	80,9	87,8	89,9	50,1	-15							
93,8	89,3					92,9	93,2	89,9	90,6	89,9	89,9	86,7	84			53	51,7	86,8	83,8	92,3	93,3	72,7	-24							
92,3	91,7					90,4	90,2	86,8	88,8	83,6	85,4	88	86,9			69	65,9	88,8	88,6	93,1	93,9	82,8	58,2							
87,8	88,5					93,8	92,9	91,4	90,9	92,8	92,6	86,2	85,6			69,6	56,2	87,2	88,5	92,9	93,2	83,2	21,9							
80,1	87,4					92	91,8	88,9	89,9	94,6	94,7	84,6	79,4			68,8	61,6	81,3	81,1	92,4	92,7	71,1	15,1							
91,3	91,4					93,6	93,3	89,7	90	90,2	90,3	86,7	84			53,4	47,1	87,3	85,1	93,7	94,5	80,1	9,1							
91,2	91,6					92,7	93,3	86,5	90,1	93,8	92,8	87,3	84,6			52,2	40,6	87,6	88,2	92,3	91,8	75,5	20,9							
						90,2	86,9																							
						94,4	91,9																							
						92,1	91,1																							
						86,7	85,5																							
						91,7	92,5																							
						89,2	88																							
						92,5	91,4																							
						91,7	91,3																							
						87,2	87,1																							
						91,9	92,5																							

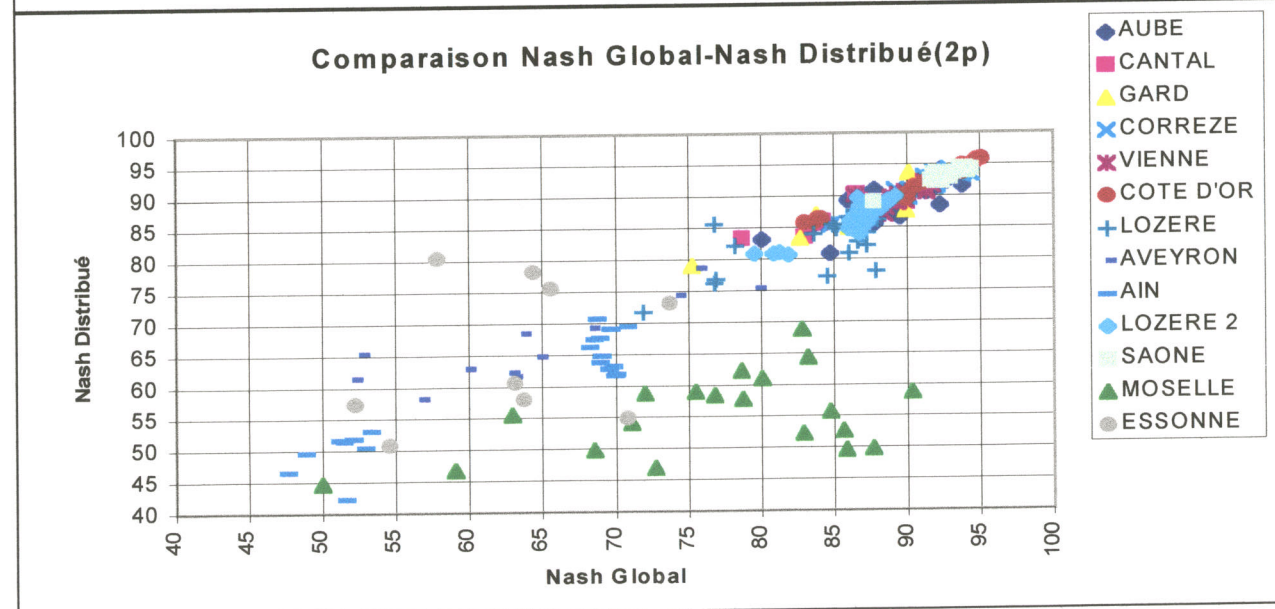
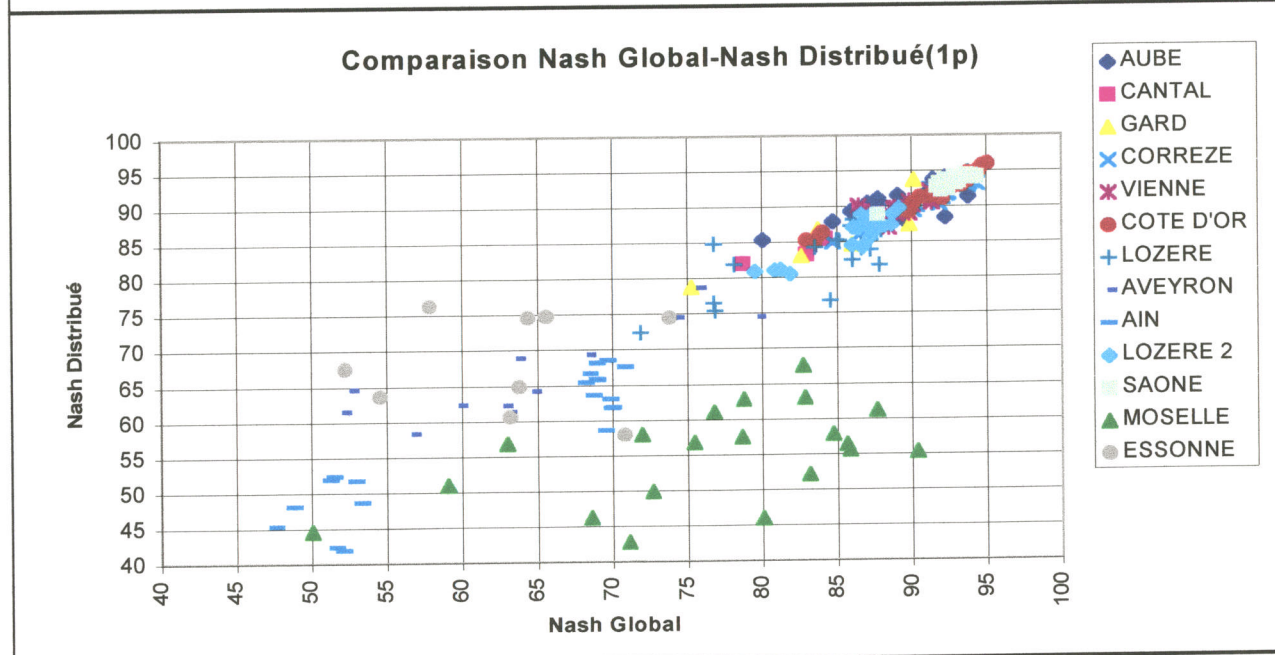
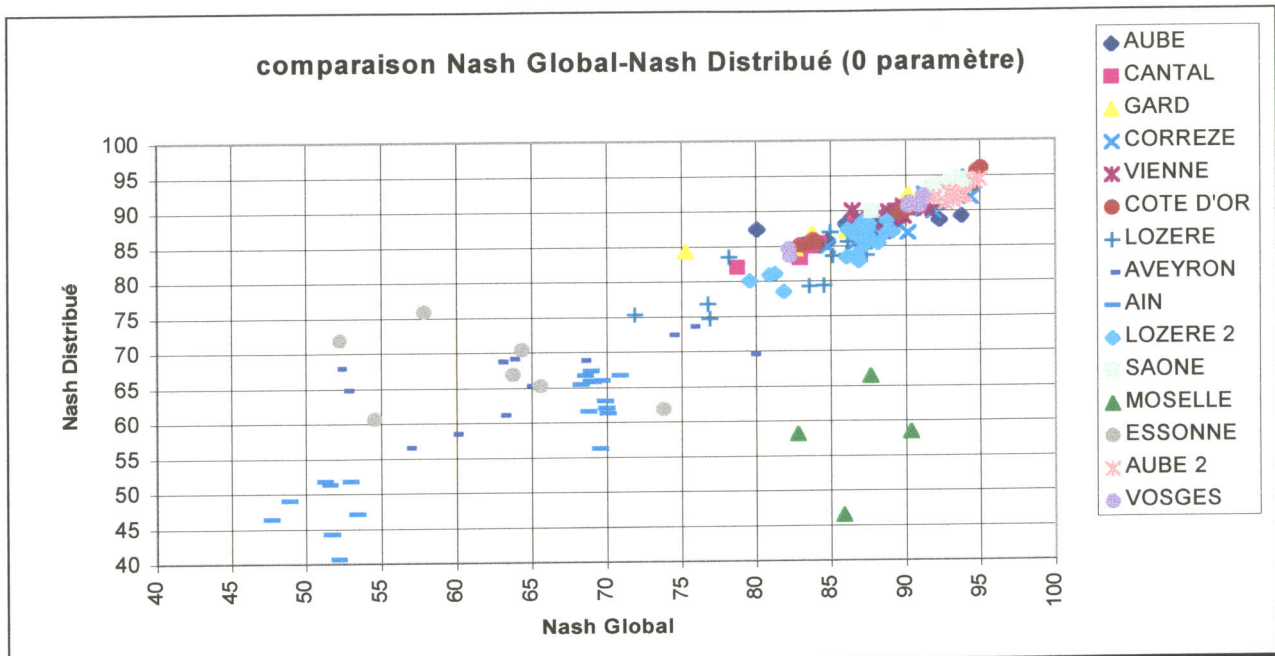
Comparaison avec 1 paramètre de calage pour le BV intermédiaire

AUBE		CANTAL		GARD		CORREZE		VIENNE		COTE D'OR		LOZERE		AVEYRON		AIN		LOZERE 2		SAONE		MOSELLE		ESSONNE		AUBE 2		VOSGES			
Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr
83,2	83,8	86,6	89,4	83,8	86,8	93,9	93,3	89,4	89,9	94,5	94,8	76,9	75,4	63,1	61,3	69,7	68,5	79,6	80,9	92,2	92,4	59,1	51	64,4	74,6	93,2	92,1	91	91,3		
92,3	88,5	84	85,6	75,3	78,8	92	91,9	90,1	90,2	90,6	91,3	85,2	85,2	62,9	62,2	51,3	51,9	86,1	84,6	94,4	94,2	76,8	61,1	57,9	76,3	92,7	91,8	90,3	91,8		
91,4	91	78,8	82	93,7	84,8	85	84,8	88,6	89	93,8	94,7	87,3	83,9	52,2	61,5	47,7	45,3	87,5	86,5	92,7	93,6	82,9	63,1	65,6	74,8	93,6	93,5	82,3	84,7		
92,7	92,8	84,3	85,5	82,7	83,1	91,9	92,1	89	89,4	84,1	86,4	87,4	87,4	79,8	74,5	69,1	65,8	88,7	87,5	94,1	94	87,7	61,2	63,2	60,6	91,9	91,9	90,2	91,7		
84,8	87,9	83	83,3	89,9	87,5	91,3	92,4	91,4	90,6	91,2	91,4	83,6	84,3	64,8	64,2	70,9	67,6	86,8	87,6	93	93,2	78,8	62,9	73,8	74,5	93,1	92,7	82,2	84,6		
91,7	92,3	89,3	89,3	86,1	84,7	91,9	90,4	89,9	89	89,5	89,5	86,1	82,5	52,7	64,6	51,6	52,3	86,9	84,6	94,2	94,3	72	58	70,8	58	93,8	92,8	91,2	92,2		
89,1	91,6					92,4	91,7	88,5	87	93,9	93,7	87,9	81,8	75,7	78,7	48,9	48,1	86,2	87,1	91,7	92,7	63	56,8	31,2	69,4	93,7	92,2				
87,8	91,1					87	86,7	88,6	88,1	83	85,3	76,8	84,8	59,9	62,3	69	68,1	88,2	87,3	94,1	94,1	85,9	55,6	33,6	67,3	95	94,8				
87,1	90,5					94,3	94,8	91,8	91,3	93,4	92,9	85	85,3	63,7	68,9	70,1	61,9	86,7	88,9	93,2	93,5	84,8	57,9	35,8	67,5	94	93,1				
89,5	88,2					91,9	92,9	90	90,4	94,8	95,7	71,9	72,4	74,3	74,5	69,9	63,1	81,9	80,6	92,5	92,4	68,6	46,3	54,6	63,6	93,6	91,6				
91,5	93,2					91,9	91,3	89,3	89,2	93,9	94,1	78,2	81,9	56,8	58,3	51,7	42,4	86,5	86,9	91,9	93,3	78,7	57,5	63,8	64,9	94,7	93,8				
91,5	93,8					94,2	93,5	89	88,8	83,9	86	86	87,3	68,4	69,3	70	61,8	89,2	89,8	94	94,4	90,4	55,3	52,3	67,5	93	92,1				
87,8	91					87,5	87,7	91,3	92,2	92,1	91,1	87,9	88			68,3	65,4	87,5	87,7	92	92,2	85,7	56,4								
86	89,4					93,6	94,1	89	89,7	95,1	96	76,8	76,5			68,6	66,7	80,9	81,1	87,8	88,9	50,1	44,5								
93,8	91,4					92,9	93,6	89,9	90,7	89,9	89,3	86,7	84,1			53	51,7	86,8	84,3	92,3	92,7	72,7	49,9								
92,3	94,1					90,4	90,2	86,8	89,4	83,6	85	88	86,7			69	65,9	88,8	89	93,1	93,5	82,8	67,6								
87,8	90,1					93,8	92,9	91,4	91	92,8	92,7	86,2	88,2			69,6	58,6	87,2	88,6	92,9	94,1	83,2	52,2								
80,1	85,4					92	91,8	88,9	89,7	94,6	95,3	84,6	76,8			68,8	63,6	81,3	81,2	92,4	92,8	71,1	42,8								
91,3	91,4					93,6	93,3	89,7	89,4	90,2	90,5	86,7	84,6			53,4	48,6	87,3	85,7	93,7	94,5	80,1	46								
91,2	92,1					92,7	93,3	86,5	90,1	93,8	93,6	87,3	85,3			52,2	41,9	87,6	87,4	92,3	93,7	75,5	56,8								
						90,2	89,5																								
						94,4	93,2																								
						92,1	91,3																								
						86,7	86,3																								
						91,7	92,4																								
						89,2	89,2																								
						92,5	91,9																								
						91,7	91,5																								
						87,2	87,4																								
						91,9	92,7																								

Comparaison avec 2 paramètres de calage pour le BV intermédiaire

AUBE		CANTAL		GARD		CORREZE		VIENNE		COTE D'OR		LOZERE		AVEYRON		AIN		LOZERE 2		SAONE		MOSELLE		ESSONNE		AUBE 2		VOSGES		
Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	Glob	Distr	
83,2	84,6	86,6	90,3	83,8	87	93,9	93,6	89,4	90,1	94,5	94,8	76,9	76,8	63,1	61,7	69,7	69	79,6	80,9	92,2	92,4	59,1	46,7	64,4	78,3	93,2	92,1	91	91,3	
92,3	88,5	84	85,7	75,3	79,1	92	92,3	90,1	90,4	90,6	91,3	85,2	84,8	62,9	62,3	51,3	51,7	86,1	84,8	94,4	94,2	76,8	58,3	57,9	80,5	92,7	91,8	90,3	91,8	
91,4	90,6	78,8	83,3	90,2	93,6	84,8	85,5	88,6	89,1	93,8	94,8	87,3	84,1	52,2	61,4	47,7	46,5	87,5	86,4	92,7	93,6	82,9	52,3	65,6	75,5	93,6	93,5	82,3	84,7	
92,7	92,1	84,3	86,1	82,7	83,4	91,9	91,7	89	89,5	84,1	86,5	87,4	88,5	79,8	75,4	69,1	64,8	88,7	89,3	94,1	94,1	87,7	49,8	63,2	60,6	91,9	92,3	90,2	91,9	
84,8	80,9	83	83,5	89,9	87,7	91,3	93	91,4	90,6	91,2	91,9	83,6	83,9	64,8	64,8	70,9	69,4	86,8	88,2	93	92,7	78,8	57,7	73,8	73,2	93,1	92,8	82,2	84,6	
91,7	90,7	89,3	89,6	86,1	84,9	91,9	91,4	89,9	89,1	89,5	89,8	86,1	81	52,7	65,3	51,6	51,4	86,9	85,4	94,2	94	72	58,7	70,8	55	93,8	93,1	91,2	92,2	
89,1	87,2					92,4	92,3	88,5	87	93,9	93,9	87,9	78,1	75,7	78,6	48,9	49,6	86,2	86	91,7	92,4	63	55,5	31,2	69,6	93,7	92,7			
87,8	85,7					87	87,4	88,6	88,1	83	85,8	76,8	85,7	59,9	62,9	69	67,6	88,2	87,8	94,1	93,8	85,9	49,6	33,6	67	95	94,8			
87,1	86,3					94,3	94,7	91,8	91,5	93,4	93,3	85	85,4	63,7	68,4	70,1	61,9	86,7	89,7	93,2	93,5	84,8	55,8	35,8	67,7	94	93,4			
89,5	86,6					91,9	93,5	90	90,4	94,8	95,6	71,9	71,7	74,3	74,4	69,9	63,1	81,9	80,8	92,5	92,2	68,6	49,8	54,6	50,8	93,6	91,8			
91,5	91,9					91,9	92,2	89,3	88,8	93,9	94,1	78,2	82,1	56,8	58,1	51,7	42,1	86,5	86,8	91,9	93,3	78,7	62,2	63,8	57,9	94,7	93,8			
91,5	92,5					94,2	93,8	89	89	83,9	86,4	86	86,7	68,4	69,2	70	61,6	89,2	90	94	94,4	90,4	58,7	52,3	57,3	93	92,3			
87,8	91					87,5	88,4	91,3	92,1	92,1	92,2	87,9	87,9			68,3	66,1	87,5	88,2	92	92,2	85,7	52,7							
86	89,4					93,6	93,5	89	89,7	95,1	95,9	76,8	76,2			68,6	67,4	80,9	80,9	87,8	89,1	50,1	44,6							
93,8	91,5					92,9	94,3	89,9	90,6	89,9	89,5	86,7	84,1			53	50,4	86,8	84	92,3	92,8	72,7	47							
92,3	94,1					90,4	90,8	86,8	89,3	83,6	85,9	88	86,2			69	63,7	88,8	89	93,1	93,6	82,8	68,9							
87,8	89,3					93,8	93,1	91,4	91	92,8	93	86,2	86,2			69,6	62,6	87,2	88,4	92,9	93,7	83,2	64,3							
80,1	83,1					92	92,6	88,9	89,7	94,6	95,2	84,6	77,3			68,8	70,6	81,3	81,2	92,4	92,8	71,1	54							
91,3	91,5					93,6	93,6	89,7	89,5	90,2	90,3	86,7	82,7			53,4	53,1	87,3	85,7	93,7	94,5	80,1	61,1							
91,2	92,1					92,7	93,9	86,5	90,1	93,8	93,7	87,3	82,2			52,2	51,8	87,6	87,5	92,3	93,7	75,5	59							
						90,2	89,8																							
						94,4	93,4																							
						92,1	91,6																							
						86,7	86,7																							
						91,7	92,7																							
						89,2	91																							
						92,5	93																							
						91,7	92,6																							
						87,2	88,2																							
						91,9	92,9																							







**Annexe n°2 : Densité de drainage par sous bassin.**

Fichier	Station	BV(km <sup>2</sup> )	Dd (km <sup>-1</sup> )
MOSELLE	Laneuveville	64,2	0,70
	Vasperviller	90,4	0,44
	Hermelange	192	0,52
AUBE	Plaines st Lange	704	0,20
	Molesmes	614	0,08
	Polisy	1450	0,15
COTEDOR	Polisy	1450	0,13
	Celles s/ Ource	730	0,19
	Bar s/ Seine	2340	0,15
SAONE	Rigny	2280	0,36
	Vitry en Charollais	820	0,29
	Le Verdier	3170	0,34
LOZERE2	Bramonas	465	0,74
	Le Monastier	456	0,64
	La Mothe	1160	0,67
AVEYRON	Entraygues 1	2180	0,67
	Entraygues 2	3280	0,58
	Entraygues 3	5460	0,61
LOZERE	Mende	250	0,82
	Les Fonts	116	0,83
	Bramonas	465	0,74
CANTAL	Pont de Vendes 1	284	0,57
	Pont de Vendes 2	117	0,43
	Pont de Vendes 3	401	0,53
CORREZE	Moulin du Bos	147	0,61
	Corrèze	167	0,76
	Tulle	356	0,71
AIN	Chézery	119	0,25
	Coz	183	0,22
	Moulin de Métral	395	0,27
GARD	Corbes	263	0,59
	Roucan	239	0,59
	Anduze	546	0,60
VIENNE	Saint Priest	1030	0,19
	Saint Priest	1160	0,19
	Peyrelevade	2300	0,19
ESSONNE	Villebon	224	0,25
	Le Breuil	632	0,25
	Morsang s/ Orge	922	0,25
AUBE 2	Rennepont	481	0,20
	Outre Aube	657	0,24
	Blaincourt	1640	0,20
VOSGES	Noir Gueux	621	0,42
	Jarmenil	369	0,54
	Epinal	1220	0,46













































**Annexe n°3 : Répartition surfacique des altitudes**

Situation géographique				Altitude				
Fichier	Station	Cours d'eau	BV(km <sup>2</sup> )	0-100m	100-200m	200-500m	500-1000m	1000-2000m
MOSELLE	Laneuveville	Sarre-Blanche	64,2	0	64%	36%	0	0
	Vasperviller	Sarre-Rouge	90,4	0	62%	38%	0	0
AUBE	Plaines st Lange	Seine	704	0	6%	92%	2%	0
	Molesmes	Laignes	614	0	6%	94%	0	0
COTEDOR	Polisy	Seine	1450	0	11%	88%	1%	0
	Celles s/ Ource	Ource	730	0	9%	90%	1%	0
SAONE	Rigny	Arroux	2280	0	0	81%	19%	0
	Vitry en Charollais	Boubince	820	0	0	99%	1%	0
LOZERE2	Bramonas	Lot	465	0	0	0	30%	70%
	Le Monastier	Colagne	456	0	0	0	12%	88%
AVEYRON	Entraygues 1	Lot	2180	0	0	9%	46%	45%
	Entraygues 2	Truyère	3280	0	0	5%	48%	47%
LOZERE	Mende	Lot	250	0	0	0	17%	83%
	Les Fonts	Bramont	116	0	0	0	42%	58%
CANTAL	Pont de Vendes 1	Sumène	284	0	0	11%	57%	32%
	Pont de Vendes 2	Mars	117	0	0	14%	64%	22%
CORREZE	Moulin du Bos	Vimbelle	147	0	0	48%	52%	0
	Corrèze	Corrèze	167	0	0	7%	93%	0
AIN	Chézery	Valserine	119	0	0	0	20%	80%
	Coz	Semine	183	0	0	2%	27%	71%
GARD	Corbes	Gardon St Jean	263	0	2%	60%	33%	5%
	Roucan	Gardon de	239	0	9%	41%	45%	5%
VIENNE	Saint Priest	Taurion	1030	0	0	48%	52%	0
	Saint Priest	Vienne	1160	0	0	41%	59%	0
ESSONNE	Villebon	Yvette	224	32%	68%	0	0	0
	Le Breuil	Orge	632	35%	65%	0	0	0
AUBE 2	Rennepont	Aujon	481	0	4%	95%	1%	0
	Outre Aube	Aube	657	0	3%	97%	0	0
VOSGES	Noir Gueux	Moselle	621	0	0	20%	69%	11%
	Jarmenil	Vologne	369	0	0	31%	67%	2%

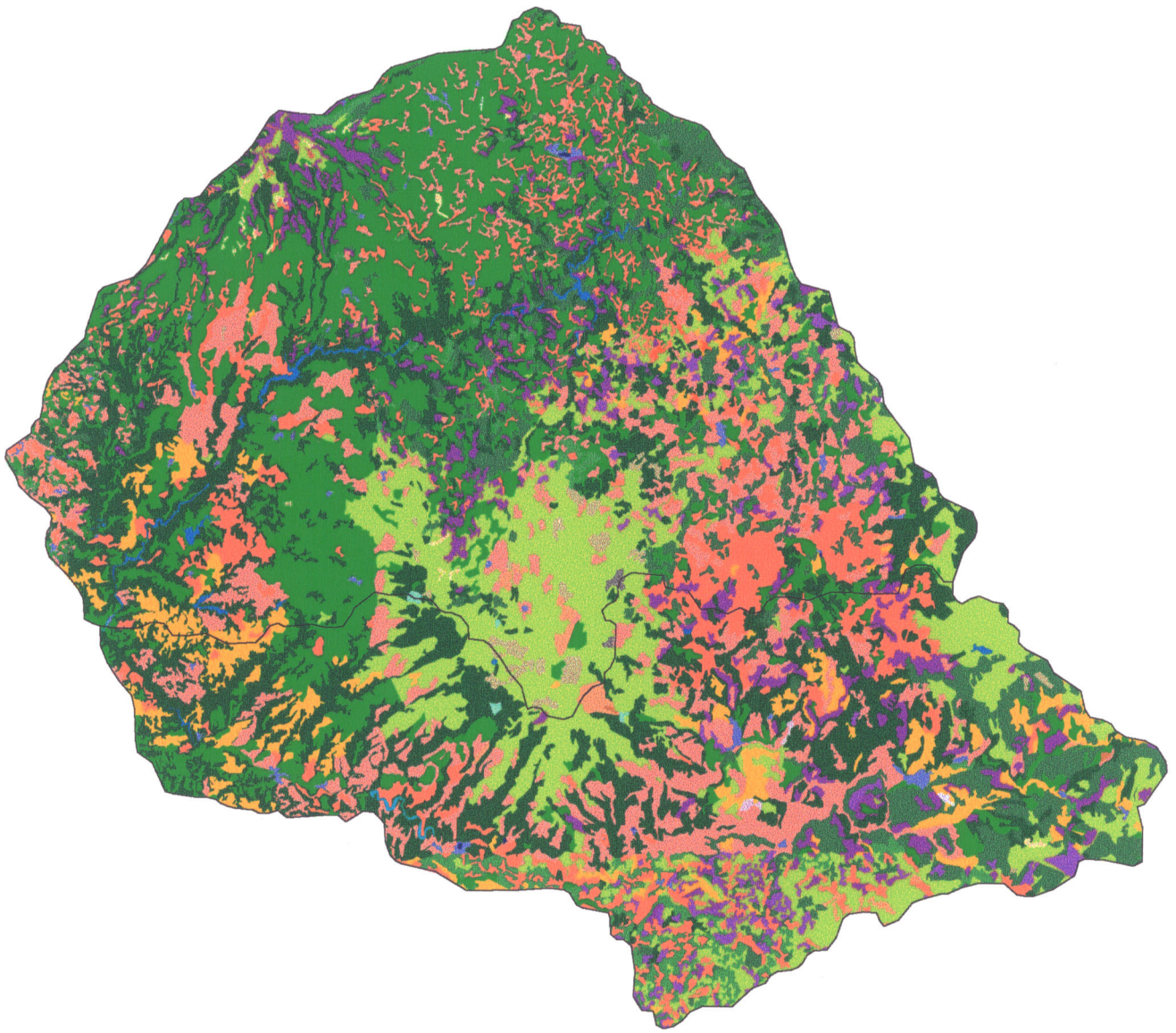
## Annexe n°4 : Résultats de la base CORINE LAND COVER et extraits de cartes.

Situation géographique			couvert végétal (corine land cover)				
Fichier	Cours d'eau	BV(km <sup>2</sup> )	territoires artificialisés	territoires agricoles	Forêts et milieux semi-naturels	Zones humides	Surfaces en eau
MOSELLE	Sarre-Blanche	64,2	0,3%	21,0%	78,0%	0,0%	0,2%
	Sarre-Rouge	90,4	1,4%	6,6%	92,0%	0,0%	0,0%
AUBE	Seine	704	0,7%	53,6%	45,7%	0,0%	0,0%
	Laignes	614	0,4%	62,7%	36,7%	0,1%	0,1%
COTEDOR	Seine	1450	0,7%	54,6%	44,6%	0,05%	0,05%
	Ource	730	0,3%	46,0%	53,7%	0,0%	0,0%
SAONE	Arroux	2280	1,6%	66,3%	31,9%	0,0%	0,2%
	Boubince	820	6,2%	77,7%	15,4%	0,0%	0,7%
LOZERE2	Lot	465	1,2%	24,6%	73,9%	0,3%	0,0%
	Colagne	456	0,7%	41,0%	58,0%	0,0%	0,3%
AVEYRON	Lot	2180	0,7%	35,7%	63,2%	0,2%	0,2%
	Truyère	3280	0,6%	56,0%	41,7%	1,0%	0,7%
LOZERE	Lot	250	1,4%	20,8%	77,5%	0,3%	0,0%
	Bramont	116	0,5%	32,2%	66,8%	0,5%	0,0%
CANTAL	Sumène	284	1,6%	74,7%	22,7%	0,9%	0,1%
	Mars	117	0,4%	60,9%	38,6%	0,1%	0,0%
CORREZE	Vimbelle	147	0,4%	48,0%	51,4%	0,0%	0,2%
	Corrèze	167	0,4%	30,7%	67,4%	1,5%	0,0%
AIN	Valserine	119	0,5%	3,0%	96,5%	0,0%	0,0%
	Semine	183	3,0%	15,0%	82,0%	0,0%	0,0%
GARD	Gardon St Jean	263	0,2%	3,6%	96,2%	0,0%	0,0%
	Gardon de Mialet	239	0,0%	4,2%	95,8%	0,0%	0,0%
VIENNE	Taurion	1030	0,8%	51,3%	47,1%	0,1%	0,7%
	Vienne	1160	0,9%	48,9%	48,7%	0,3%	1,2%
ESSONNE	Yvette	224	23,2%	41,5%	35,2%	0,1%	0,0%
	Orge	632	10,8%	56,6%	32,6%	0,0%	0,0%
AUBE 2	Aujon	481	1,2%	46,8%	51,8%	0,0%	0,2%
	Aube	657	0,5%	41,3%	58,1%	0,0%	0,1%
VOSGES	Moselle	621	5,1%	22,8%	72,0%	0,1%	0,0%
	Vologne	369	3,5%	35,8%	60,0%	0,2%	0,5%

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
1, Territoires artificialisés	<p>11, Zones urbanisées</p> <p>12, Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication</p> <p>13, Mines, décharges et chantiers</p> <p>14, Espaces verts artificialisés non agricoles</p>	<p>111, Tissu urbain continu</p> <p>112, Tissu urbain discontinu</p> <p>121, Zones industrielles et commerciales</p> <p>122, Réseaux routiers et ferroviaire et espaces associés</p> <p>123, Zones portuaires</p> <p>124, Aeroports</p> <p>131, Extraction de matériaux</p> <p>132, Décharges</p> <p>133, Chantiers</p> <p>141, Espaces verts urbains</p> <p>142, Equipements sportifs et de loisirs</p>
2, Territoires agricoles	<p>21, Terres arables</p> <p>22, Cultures permanentes</p> <p>23, Prairies</p> <p>24, Zones agricoles hétérogènes</p>	<p>211, Terres arables hors périmètres d'irrigation</p> <p>212, Périmètres irrigues en permanence</p> <p>213, Rizières</p> <p>221, Vignobles</p> <p>222, Vergers et petits fruits</p> <p>223, Oliveraies</p> <p>231, Prairies</p> <p>241, Cultures annuelles associées aux cultures permanentes</p> <p>242, Systèmes culturaux et parcellaires complexes</p> <p>243, Terres principalement occupés par l'agriculture avec végétation naturelle</p> <p>244, Territoires agroforestiers</p>
3, Forêts et milieux semi-naturels	<p>31, Forêts</p> <p>32, Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée</p> <p>33, Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation</p>	<p>311, Forêts de feuillus</p> <p>312, Forêts de conifères</p> <p>313, Forêts mélangées</p> <p>321, Pelouses et paturages naturels</p> <p>322, Landes et broussailles</p> <p>323, Végétation sclérophylle</p> <p>324, Forêts et végétation arbustive en mutation</p> <p>331, Plages dunes et sable</p> <p>332, Roches nues</p> <p>333, Végétation clairsemée</p> <p>334, Zones incendiées</p> <p>335, Glaciers et neiges éternelles</p>
4, Zones humides	<p>41, Zones humides intérieures</p> <p>42, Zones humides maritimes</p>	<p>411, Marais intérieurs</p> <p>412, Tourbières</p> <p>421, Marais maritimes</p> <p>422, Marais salants</p> <p>423, Zones intertidales</p>
5, Surfaces en eau	<p>51, Eaux continentales</p> <p>52, Eaux maritimes</p>	<p>511, Cours et voies d'eau</p> <p>512, Plans d'eau</p> <p>521, Lagunes littorales</p> <p>522, Estuaires</p> <p>523, Mers et océans</p>

-  Tissu urbain continu
-  Tissu urbain discontinu
-  Zones industrielles et commerciales
-  Réseaux routiers et ferroviaire et espaces associés
-  Zones portuaires
-  Aeroports
-  Extraction de matériaux
-  Décharges
-  Chantiers
-  Espaces verts urbains
-  Equipements sportifs et de loisirs
-  Terres arables hors périmètres d'irrigation
-  Périmètres irrigués en permanence
-  Rizières
-  Vignobles
-  Vergers et petits fruits
-  Oliveraies
-  Prairies
-  Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
-  Systèmes cultureux et parcellaires complexes
-  Terres principalement occupées par l'agriculture avec végétation naturelle
-  Territoires agroforestiers
-  Forêts de feuillus
-  Forêts de conifères
-  Forêts mélangées
-  Pelouses et pâturages naturels
-  Landes et broussailles
-  Végétation sclérophylle
-  Forêts et végétation arbustive en mutation
-  Plages dunes et sable
-  Roches nues
-  Végétation clairsemée
-  Zones incendiées
-  Glaciers et neiges éternelles
-  Marais intérieurs
-  Tourbières
-  Marais maritimes
-  Marais salants
-  Zones intertidales
-  Cours et voies d'eau
-  Plans d'eau
-  Lagunes littorales
-  Estuaires
-  Mers et océans





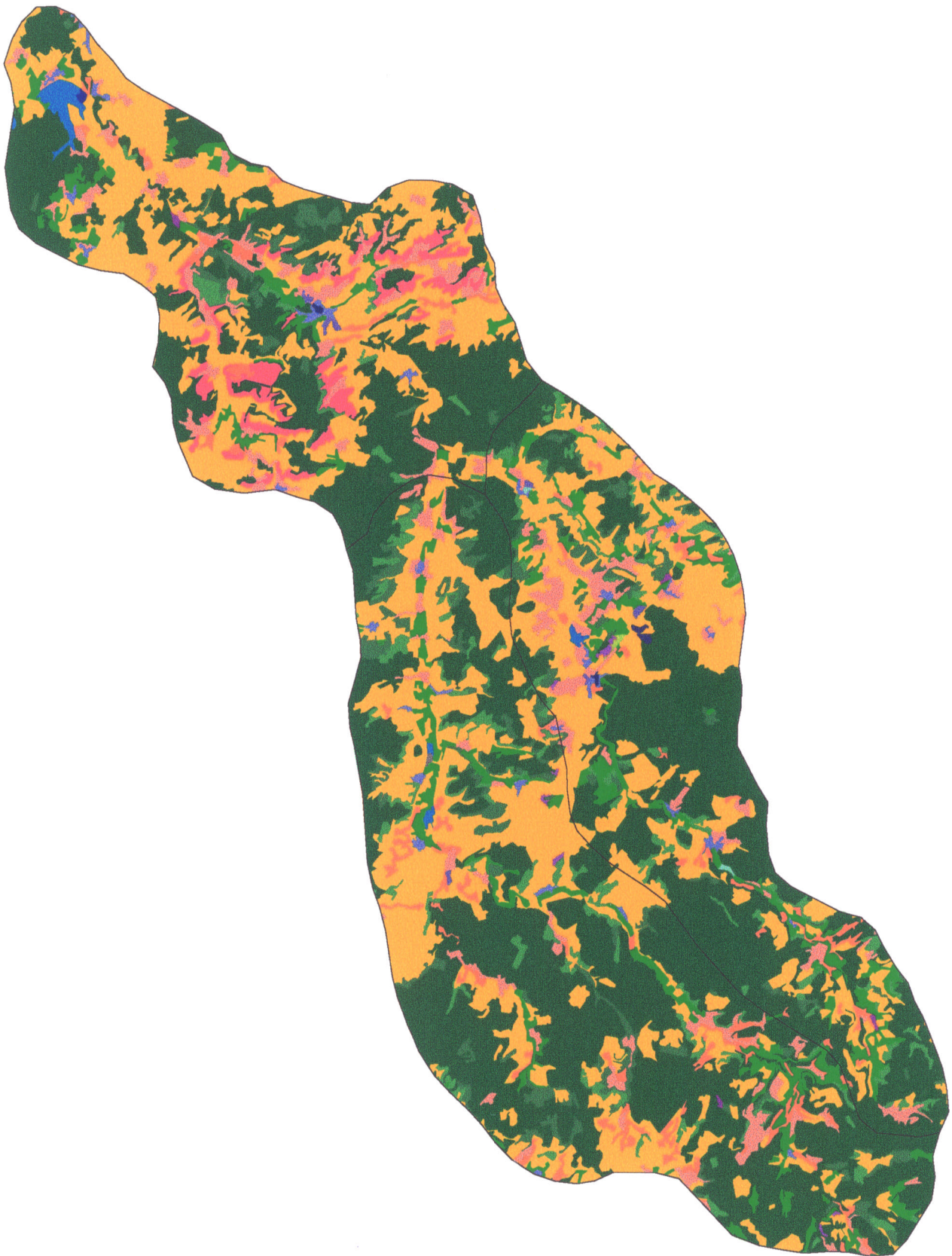
AVEYRON



1 111	307,997.21730	2217981000.000	0.014
1 112	12,238,899.24140	2217981000.000	0.552
1 124	764,499.33415	2217981000.000	0.034
1 131	670,344.27954	2217981000.000	0.030
1 142	1,993,964.63414	2217981000.000	0.090
1 211	160,673,481.82485	2217981000.000	7.244
1 231	178,067,783.68796	2217981000.000	8.028
1 242	286,843,504.54660	2217981000.000	12.933
1 243	165,394,579.25735	2217981000.000	7.457
1 311	575,129,628.53591	2217981000.000	25.930
1 312	202,591,940.64034	2217981000.000	9.134
1 313	77,065,011.70555	2217981000.000	3.475
1 321	404,085,315.12322	2217981000.000	18.219
1 322	82,557,305.03031	2217981000.000	3.722
1 323	1,988,820.02377	2217981000.000	0.090
1 324	45,540,967.60667	2217981000.000	2.053
1 332	1,022,245.33605	2217981000.000	0.046
1 333	11,181,329.83854	2217981000.000	0.504
1 411	914,346.32430	2217981000.000	0.041
1 412	3,725,775.19766	2217981000.000	0.168
1 511	3,160,129.70715	2217981000.000	0.142
1 512	2,061,897.89945	2217981000.000	0.093
2 111	339,232.80490	3352526000.000	0.010
2 112	15,665,418.53676	3352526000.000	0.467
2 121	684,761.15571	3352526000.000	0.020
2 122	401,813.67812	3352526000.000	0.012
2 124	175,441.65179	3352526000.000	0.005
2 131	2,422,988.48019	3352526000.000	0.072
2 142	832,728.08521	3352526000.000	0.025
2 211	68,846,177.70546	3352526000.000	2.054
2 231	1178267878.49404	3352526000.000	35.146
2 241	252,330.73489	3352526000.000	0.008
2 242	370,096,959.24511	3352526000.000	11.039
2 243	257,023,377.04391	3352526000.000	7.667
2 244	2,250,220.17572	3352526000.000	0.067
2 311	571,551,969.22163	3352526000.000	17.048
2 312	214,737,046.52261	3352526000.000	6.405
2 313	44,955,685.25008	3352526000.000	1.341
2 321	408,967,364.51641	3352526000.000	12.199
2 322	115,222,808.49306	3352526000.000	3.437
2 324	33,468,085.46835	3352526000.000	0.998
2 332	1,055,292.16456	3352526000.000	0.031
2 333	9,584,142.52919	3352526000.000	0.286
2 411	5,397,965.28633	3352526000.000	0.161
2 412	27,108,968.28354	3352526000.000	0.809
2 511	90,850.38591	3352526000.000	0.003
2 512	22,775,030.56778	3352526000.000	0.679

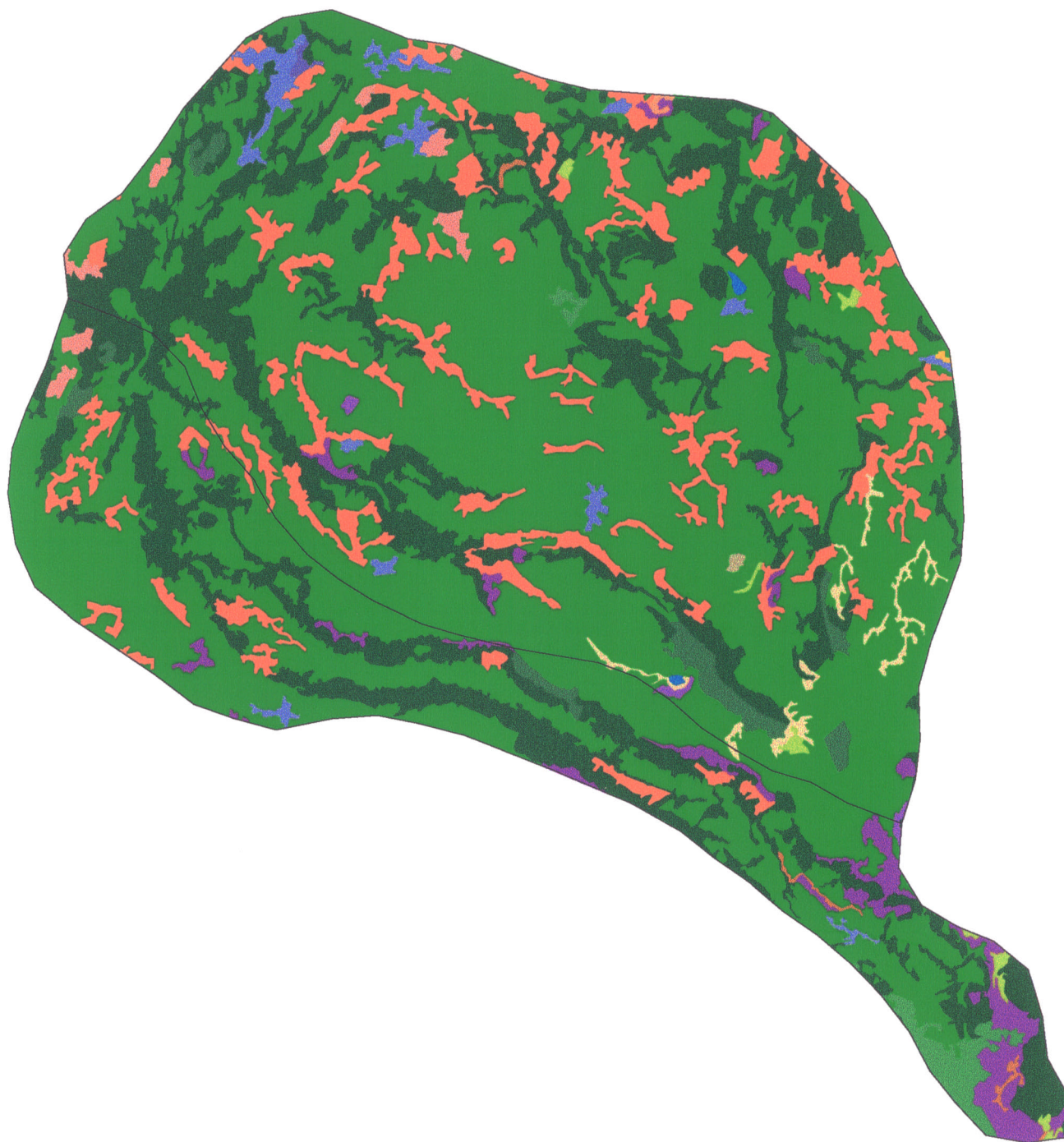
Bassin AVEYRON

Col 1 : numéro du sous-bassin,  
 Col 2 : code de la couverture,  
 Col 3 : surface (en m<sup>2</sup>) de la zone correspondant au code,  
 Col 4 : superficie totale du sous-bassin,  
 Col 5 : % de surface correspondant au code.

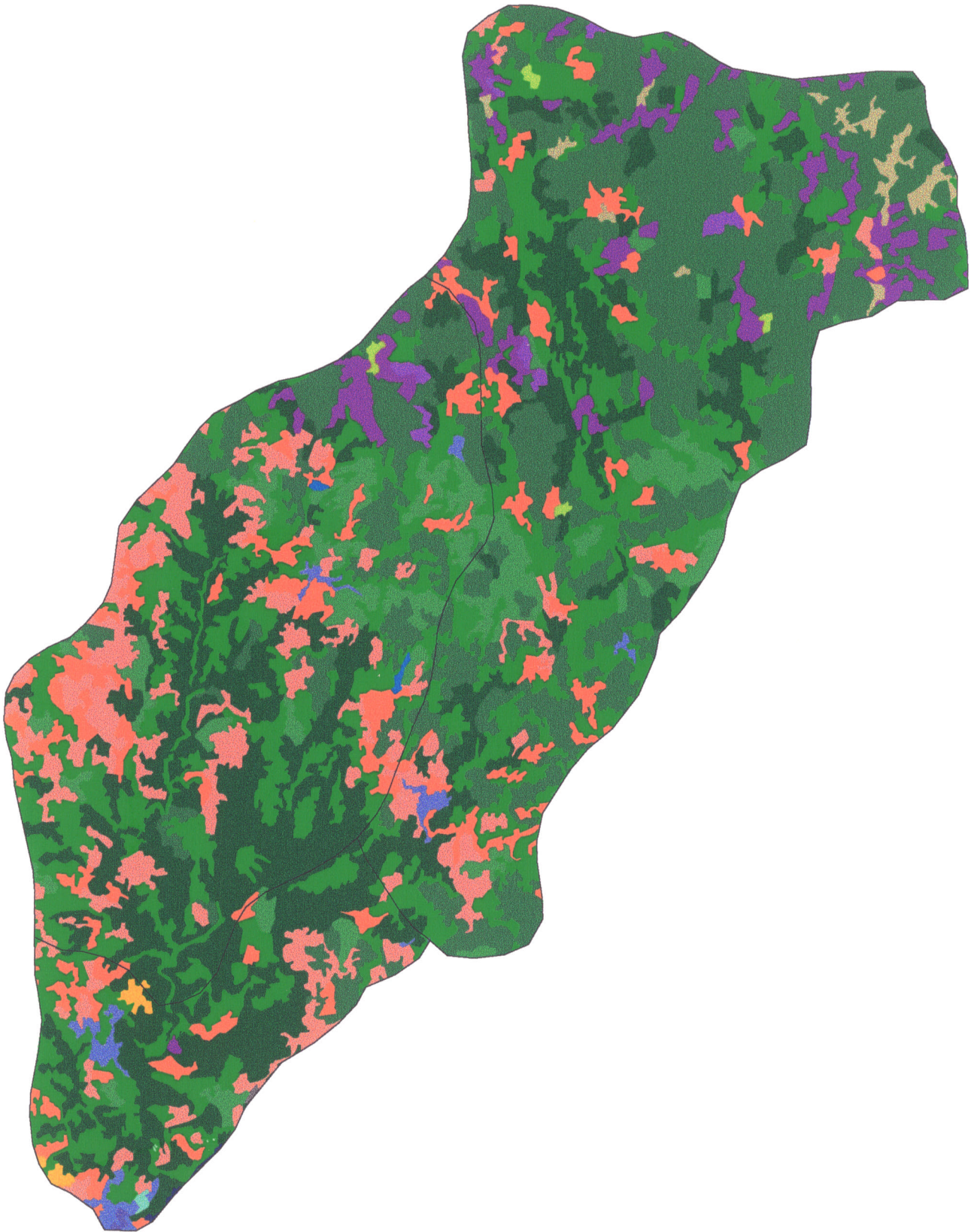


AUBE2



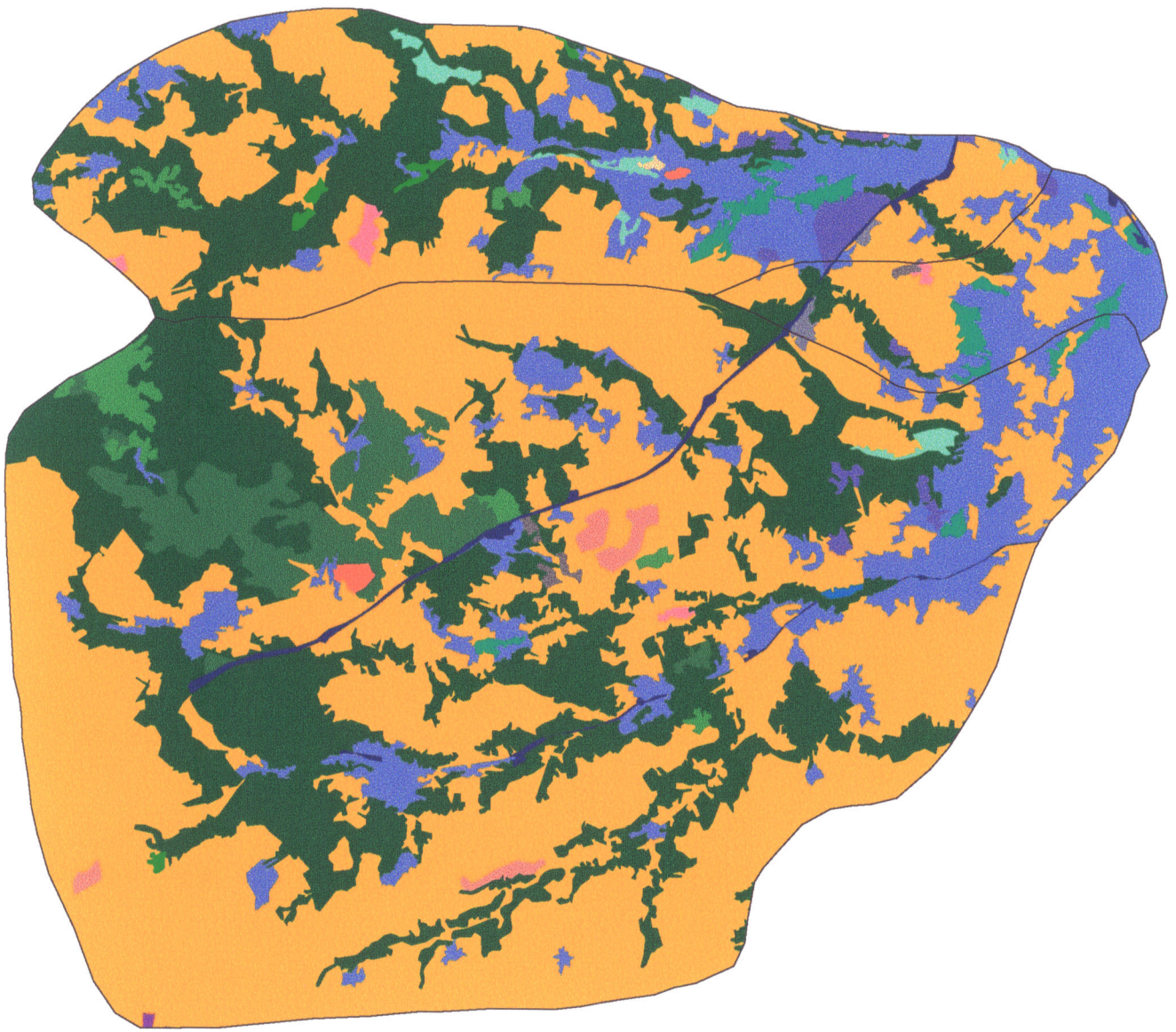


CANTAL

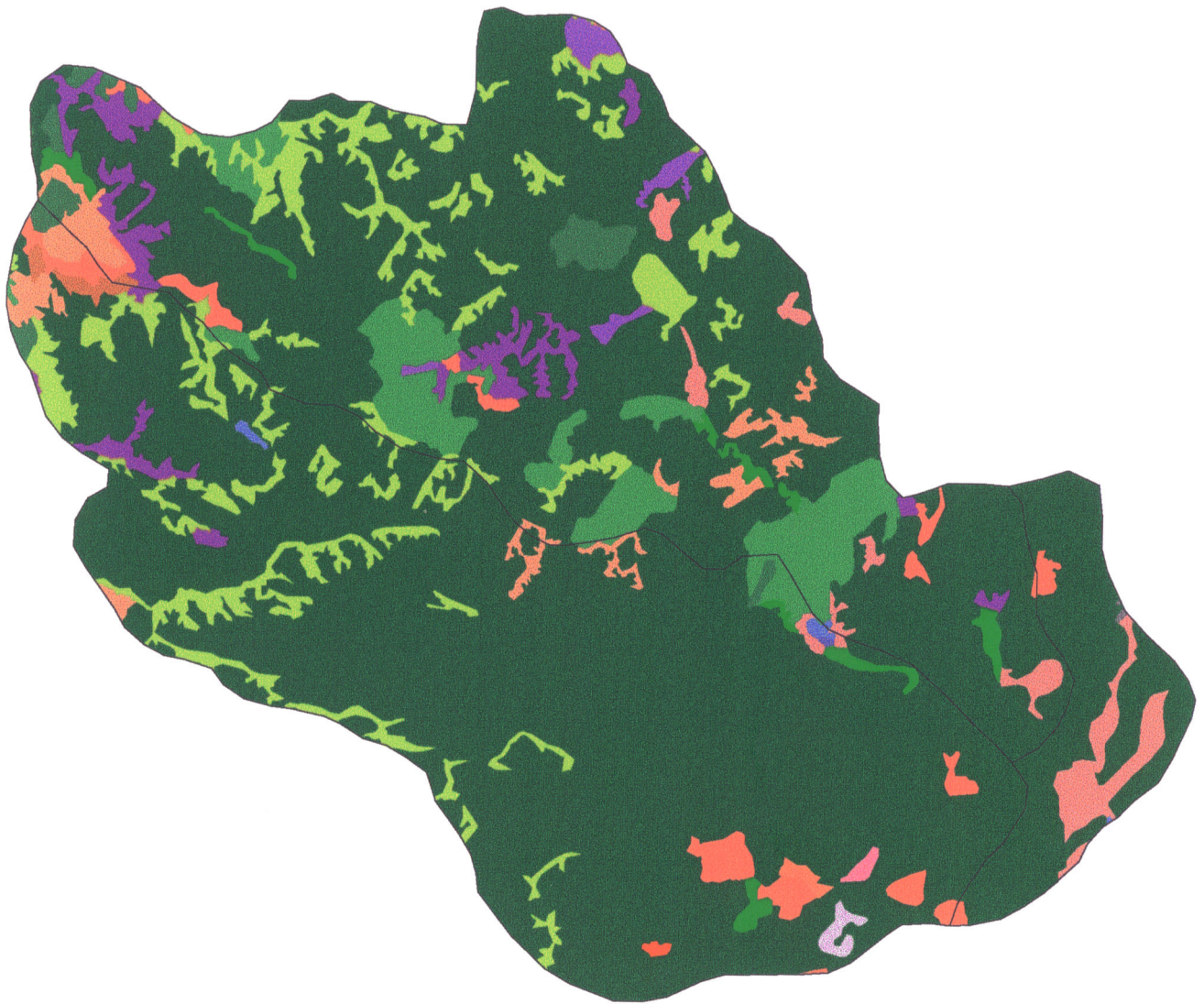


CORREZE



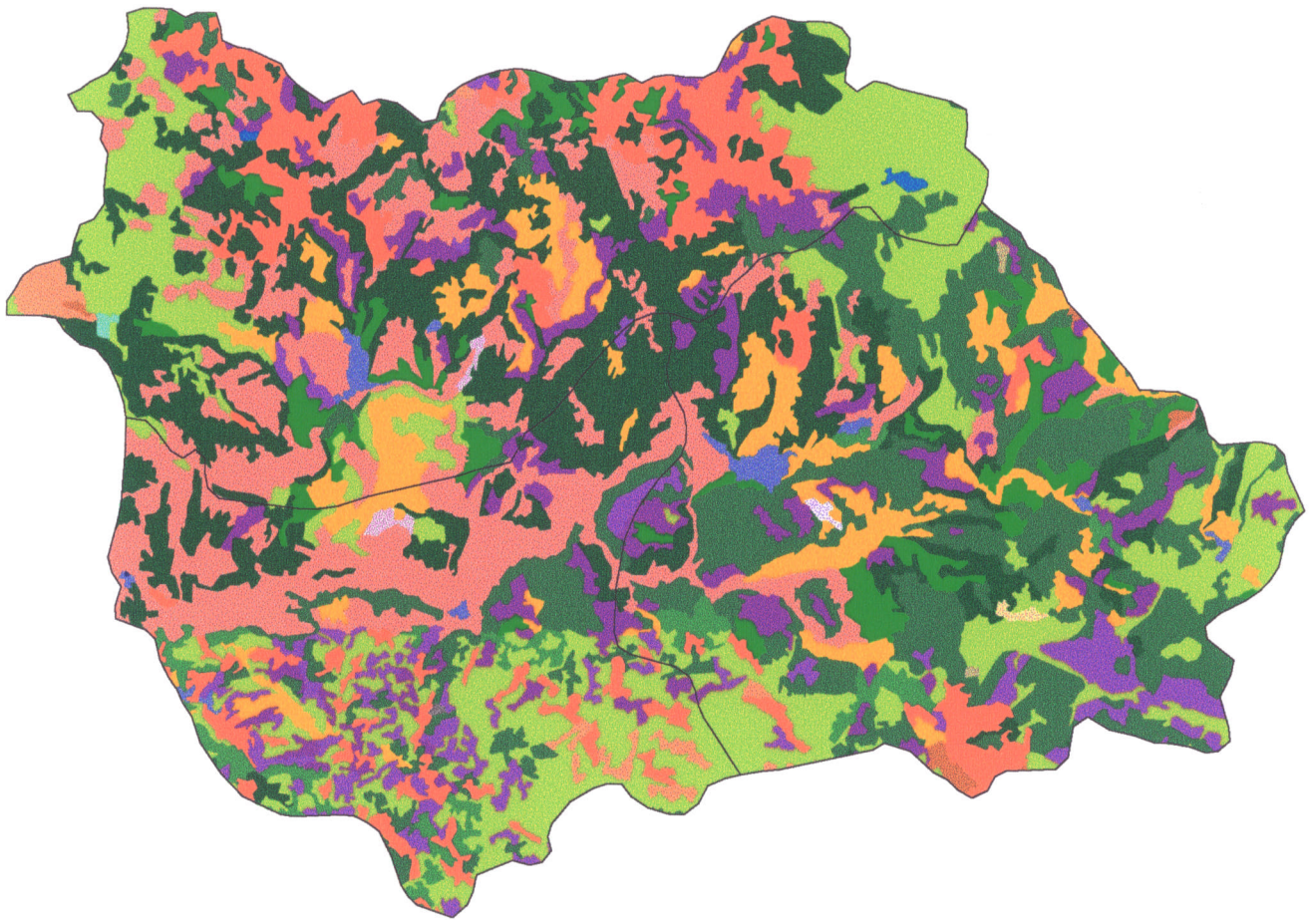


ESSONNE

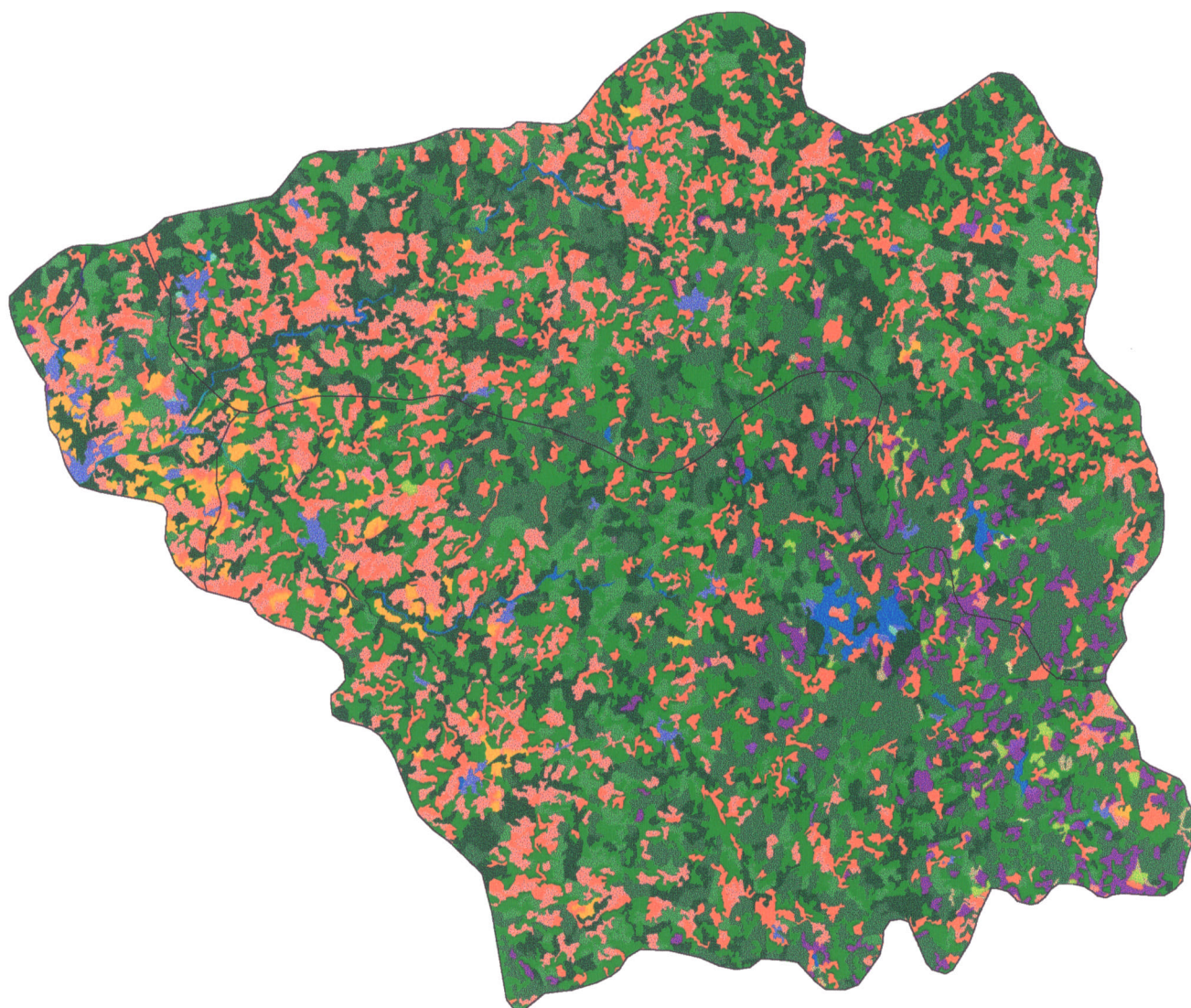


GARD





LOZERE2



VIENNE



**ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT  
DE STRASBOURG**

1, quai Koch-B.P. 1039 F-67070 STRASBOURG Cedex

**Mémoire de fin d'études**

Auteur :  <b>Jean-Christophe Baudez</b>	Promotion :  <b>Guadeloupe</b>
Titre :  <b>DETERMINANTS HYDROLOGIQUES REGIONAUX POUR LA GESTION ET LA PREVISION DES RESSOURCES EN EAU</b>	Année de publication :  <b>1997</b>
Nb. volume(s) : 1                                      Nb. pages : 88                                      Nb. réf. biblio : 40	
Structure d'accueil :  <b>CEMAGREF - Groupement d'Antony - Division Hydrologie</b>  Parc de Tourvoie - B.P. 121 - 92185 ANTONY Cedex	
Résumé : <p>L'intérêt d'une approche distribuée par rapport à une approche globale dans la modélisation pluie-débit n'a jamais été résolue de façon objective. Cette étude cherche donc à remédier à cette lacune, en étudiant la pertinence d'une division d'une maille (ici, un bassin versant jaugé) en deux mailles plus fines (deux sous-bassins, eux-mêmes jaugés).</p> <p>L'agglomération des flux calculés (les débits) en sortie des deux mailles n'apporte pas d'amélioration significative des résultats par rapport aux flux calculés en sortie de la maille globale. Néanmoins, au cas par cas, des différences apparaissent.</p> <p>D'autre part, l'analyse et la quantification des hétérogénéités distinguant les deux mailles ne met pas en évidence de lien direct entre les différences observées sur le terrain et celles observées à travers les résultats de la modélisation.</p> <p>Ainsi, sur la base de l'échantillon étudié, il est impossible de définir objectivement la prépondérance d'une approche sur l'autre, mais de surcroît, les caractéristiques physiques répertoriées ici ne permettent pas de choisir, au cas par cas, l'une ou l'autre des approches.</p>	
Mots-clés :  modélisation, approche globale, approche distribuée, caractéristiques physiographiques, statistiques, spatialisation, base Corine Land Cover.	